**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

FILIPPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES

**Mapa de fragilidade ambiental: conceituação e aplicação em um
setor do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA).**

São Carlos
2013

FILIPPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES

**Mapa de fragilidade ambiental: conceituação e aplicação em um
setor do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA).**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de mestre
em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G491m	<p>GIMENES, FILIPE BIAGGIONI QUESSADA</p> <p>Mapa de fragilidade ambiental: conceituação e aplicação em um setor do oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA). / FILIPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES; orientador Prof. Oswaldo Augusto Filho. São Carlos, 2013.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.</p> <p>1. Fragilidade ambiental. 2. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 3. Processo de análise hierárquica (AHP). 4. Oleoduto OSBRA. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FILIPPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES**.

Título da dissertação: "Mapa de fragilidade ambiental: conceituação e aplicação em um setor do oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA)".

Data da defesa: 17/05/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Oswaldo Augusto Filho** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Reinaldo Lorandi**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **Fábio Augusto Gomes Vieira Reis**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Rio Claro)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre se sacrificou por mim e sem a qual eu não estaria realizando mais esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me acompanhar e proteger, especialmente nesta etapa.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho, pela ótima orientação, com seus ensinamentos, conselhos e atenção dedicada.

A minha família, especialmente minha mãe Rita Biaggioni, por sempre estar presente e me apoiar em todas as etapas da minha vida.

A minha melhor amiga e namorada, Jaqueline Ruiz, por me acompanhar de perto no mestrado e me auxiliar em diversos momentos com a pesquisa.

Aos meus amigos do Departamento de Geotecnia, Bruno Medeiros, Rômulo Magri, Mariana Fernandes e Camila Cerdeira pelo companheirismo e contribuições para a pesquisa.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia, por sempre estarem dispostos a ajudar em ensaios e transmitir conhecimentos.

Aos funcionários da secretaria, Maristela, Álvaro e Neiva pela atenção e gentileza com que sempre me trataram.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

RESUMO

Gimenes FBQ. Mapa de fragilidade ambiental: conceituação e aplicação no oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA) [dissertação]. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 2013. 165 p.

Atualmente existem diferentes definições para o conceito de fragilidade ambiental, o que dificulta sua aplicação e a comparação entre os resultados de diferentes métodos. Este trabalho realiza uma revisão bibliográfica sistemática a cerca desse conceito e adota a definição considerada mais adequada. Com base na definição adotada foi proposto e aplicado um método para avaliar a fragilidade ambiental de uma área de estudo. Esse método utiliza pesos para ponderar os diferentes atributos (meio físico, biótico e socioeconômico) envolvidos na análise de fragilidade ambiental, que são definidos com a aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP). O método proposto também se fundamenta na utilização de um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a estruturação da base de dados, a realização das análises espaciais e a ponderação dos mapas necessários. A área de estudo corresponde a um setor do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), com extensão de 18,5km e largura de 2km (área total de 83,99km²) e utilizou-se uma base cartográfica digital na escala 1:10.000. Foram realizadas vistorias de campo para levantar pontos de observação de superfície e para coletar amostras de solo. Realizaram-se ensaios geotécnicos, químicos e mineralógicos com as amostras coletadas. A aplicação do método consistiu na geração de mapas de suscetibilidade intermediários, que combinados geraram o mapa de fragilidade ambiental. Foi importante a utilização do método AHP, pois ele reduz a subjetividade das ponderações qualitativas realizadas. Os resultados obtidos esclarecem a definição do conceito de fragilidade ambiental, além de mostrar a importância da seleção e ponderação dos atributos utilizados no método. O mapa final gerado também permitiu avaliar a sensibilidade do método e seu potencial de aplicação prática.

Palavras-chave: Fragilidade ambiental. Sistema de Informação Geográfica (SIG). Processo de Análise Hierárquica (AHP). Oleoduto OSBRA.

ABSTRACT

Gimenes FBQ. *Environmental fragility map: concept and application in São Paulo – Brasília oil pipeline* (OSBRA). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 2013. 165 p.

Currently there are different definitions to the concept of environmental fragility; it complicates its application and makes difficult to compare between different methods. This work addresses the main definitions to this concept and adopts the one considered the most proper. Based in the adopted definition it was proposed a method to evaluate the environmental fragility of a study area. This method applies weights to the different attributes (physical, biotic and socioeconomic) related to the environmental fragility analysis, which are assigned using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The method also uses Geographic Information System (GIS) software to structure the database, to conduct the spatial analysis and to assign weights to the maps. The study area is a sector of the São Paulo – Brasília oil pipeline (OSBRA), covering 18.5km length and 2km wide (total area of 83,99km²) and it was used a digital cartographic map at the scale of 1:10,000. Field trips were made to obtain surface observation points and to collect soil samples. Geological and geotechnical tests, mineralogical tests and chemistry analysis were conducted with the soil samples. The method application consists in generating intermediates susceptibility maps, that were combined to generate the environmental fragility map. It was important to use the AHP method, because it reduces the subjectivity of the qualitative weight assignment. The obtained results elucidate the environmental fragility concept and show the importance of the selection and weight assignment of the attributes used in the method. Moreover, the final map provided to evaluate the method sensitivity and its potential of practical application.

Keywords: Environmental fragility. Geographical Information System (GIS). Analytic Hierarchy Process (AHP). OSBRA oil pipeline.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Localização da área de estudo.....	19
Figura 2.2 – Localização da área de estudo no estado de São Paulo e no Brasil.	21
Figura 3.1 – Modelo conceitual para quantificação da fragilidade. Adaptado de Rossi (2001) apud Pecci (2009).....	32
Figura 3.2 – Sistema de indicadores de avaliação de vulnerabilidade ecológica. Adaptado de Guan et al. (2007).	34
Figura 3.3 – Mapa de fragilidade ecológico ambiental para os 25 municípios de Chongqing. Adaptado de Guan et al. (2007).	36
Figura 3.4 – Comparação de preferência entre duas opções.	55
Figura 3.5 – Comparação de preferência com três opções.	55
Figura 3.6 – Estrutura geral de Sistemas de Informação Geográfica (Câmara, Davis, 2001).	59
Figura 4.1 – Etapas do método de geração do mapa de fragilidade ambiental.....	63
Figura 4.2 – Possíveis resultados para o teste de azul de metileno (adaptado de Musso, 2008 <i>apud</i> Rodríguez, 2013).	73
Figura 5.1 – Mapa de declividades.....	81
Figura 5.2 – Mapa de curvatura.	83
Figura 5.3 – Mapa de materiais inconsolidados.	85
Figura 5.4 – Mapa de uso e ocupação.	88
Figura 5.5 – Mapa de distâncias relativas às drenagens.	90
Figura 5.6 – Distribuição dos pluviômetros na área de estudo.	91
Figura 5.7 – Mapa de chuvas intensas médias.....	94
Figura 5.8 – Foto ilustrando o principal tipo de uso da área de estudo (cana-de-açúcar).	97
Figura 5.9 – Foto identificando o contato entre duas unidades de materiais inconsolidados.	97
Figura 5.10 – Fotos dos perfis de alteração: a) cobertura arenosa; b) solo residual basalto jovem; c) solo residual arenito intertrapiano; d) solo residual arenito Botucatu.	98
Figura 5.11 – Foto de amostra indeformada coletada do solo residual de arenito Botucatu.	99
Figura 5.12 – Curvas granulométricas dos solos residuais de arenito.	101
Figura 5.13 – Curvas granulométricas dos solos residuais de basalto.	102
Figura 5.14 – Curva granulométrica da cobertura arenosa.	103
Figura 5.15 – Resultado do ensaio de ATD para o solo residual de Basalto Jovem.	107
Figura 5.16 – Resultado do ensaio de ATD para o solo residual de Basalto Maduro.	107
Figura 5.17 – Gráficos de Difração de Raios-X para solo residual de Basalto Jovem.	109
Figura 5.18 – Gráficos de Difração de Raios-X para solo residual de Basalto Maduro.	110
Figura 5.19 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade à erosão.....	112
Figura 5.20 – Mapa de suscetibilidade à erosão.....	118

Figura 5.21 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.	119
Figura 5.22 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.	125
Figura 5.23 – Atributos e suas respectivas classes definidos para o mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial.....	126
Figura 5.24 – Mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial.....	132
Figura 5.25 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade à corrosão.	133
Figura 5.26 – Mapa de suscetibilidade à corrosão.	136
Figura 5.27 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade ao colapso.	138
Figura 5.28 – Mapa de suscetibilidade ao colapso.	141
Figura 5.29 – Atributo e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.	142
Figura 5.30 – Mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.....	144
Figura 5.31 – Atributo e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade a chuvas intensas.	146
Figura 5.32 – Mapa de fragilidade ambiental comparando o resultado com a aplicação do filtro.....	149
Figura 5.33 – Agrupamento esquemático das bacias.	152

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Principais definições de Fragilidade, em estudos ambientais, encontradas na literatura científica.....	24
Tabela 3.2 – Principais Métodos para quantificação da fragilidade em estudos ambientais.	31
Tabela 3.3 – Matriz dos índices de Dissecação do Relevo (Ross, 1994).	36
Tabela 3.4 – Classes de fragilidade para solos (Ross, 1994).	37
Tabela 3.5 – Graus de proteção da cobertura vegetal (Ross, 1994).	38
Tabela 3.6 – Classes de declividade (Ross, 1994).	39
Tabela 3.7 – Classes de Vulnerabilidade (Spörl, Ross, 2004).	40
Tabela 3.8 – Classes de declividade para processo erosivo.	45
Tabela 3.9 – Classes de declividade.....	48
Tabela 3.10 – Matriz recíproca de comparação pareada.....	55
Tabela 3.11 – Soma das colunas da matriz recíproca.....	56
Tabela 3.12 – Normalização da matriz recíproca.....	57
Tabela 3.13 – Cálculo do Auto vetor da Matriz recíproca.....	57
Tabela 3.14 – Índice de Consistência Randômico calculado para 500 matrizes (Teknomo, 2006).....	58
Tabela 4.1 – Atributos utilizados para elaboração dos mapas de suscetibilidade intermediários.	65
Tabela 4.2 – Exemplo de matriz AHP utilizada.....	66
Tabela 5.1 – Distribuição de classes de declividade.	82
Tabela 5.2 – Distribuição de classes de curvatura do terreno.	82
Tabela 5.3 – Distribuição percentual de classes de materiais inconsolidados.	84
Tabela 5.4 – Distribuição em área das classes de uso e ocupação.	87
Tabela 5.5 – Distribuição de área das classes de distâncias.	89
Tabela 5.6 – Dados de chuva acumulada registrados em pluviômetros.	92
Tabela 5.7 – Distribuição em área das classes de chuvas médias.	93
Tabela 5.8 – Pontos de controle levantados nas vistorias de campo.	96
Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de massa específica.	100
Tabela 5.10 – Resultados dos ensaios de granulometria conjunta.	100
Tabela 5.11 – Índices físicos das unidades.....	104
Tabela 5.12 – Resultados das análises de pH e Eh.	105
Tabela 5.13 – Resultados do ensaio de Azul de Metileno.	106
Tabela 5.14 – Interpretação dos resultados do ensaio de Difração de Raios-X.	108
Tabela 5.15 – Matriz AHP dos atributos utilizados no mapa de suscetibilidade à erosão.	112
Tabela 5.16 – Matriz AHP das classes de declividade para erosão.....	113
Tabela 5.17 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para erosão.....	114
Tabela 5.18 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para erosão.	115
Tabela 5.19 – Matriz AHP das classes de curvatura para erosão.	116
Tabela 5.20 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade à erosão.	117

Tabela 5.21 – Matriz AHP dos atributos utilizados no mapa de movimentos de massa.....	120
Tabela 5.22 – Matriz AHP das classes de declividade para movimentos de massa.	121
Tabela 5.23 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para movimentos de massa.	122
Tabela 5.24 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para movimentos de massa.	123
Tabela 5.25 – Matriz AHP das classes de curvatura do terreno para movimentos de massa.	123
Tabela 5.26 – Distribuição por área das classes de suscetibilidade à movimentos de massa.	124
Tabela 5.27 – Matriz AHP dos atributos utilizados no mapa de escoamento superficial.	127
Tabela 5.28 – Matriz AHP das classes de declividade para escoamento superficial.	128
Tabela 5.29 – Matriz AHP das classes de índice de circularidade para escoamento superficial.	129
Tabela 5.30 – Matriz AHP das classes de solo para escoamento superficial.	130
Tabela 5.31 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para escoamento superficial.....	131
Tabela 5.32 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade ao escoamento superficial.	131
Tabela 5.33 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para corrosão.	134
Tabela 5.34 – Matriz AHP das classes de distância de drenagem perene para corrosão.	135
Tabela 5.35 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade à corrosão.	137
Tabela 5.36 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para colapso.	139
Tabela 5.37 – Matriz AHP das classes de distância de drenagem perene para colapso.....	140
Tabela 5.38 – Distribuição em área das classes do mapa de suscetibilidade ao colapso.....	140
Tabela 5.39 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para os fatores bióticos e socioeconômicos.	143
Tabela 5.40 – Distribuição em área das classes do mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.....	145
Tabela 5.41 – Matriz AHP para das classes de precipitação.....	147
Tabela 5.42 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade a chuvas intensas.	147
Tabela 5.43 – Distribuição em área das classes de fragilidade ambiental com e sem refinamento. ..	148
Tabela 5.44 – Distribuição em área de bacias para as classes de fragilidade ambiental.	150

Lista de Abreviaturas e Siglas

%Arg	Porcentagem de argila na amostra
2θ	Ângulo de difração
A	Área da face da molécula de azul de metileno
Å	Distância basal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Acb	Atividade da fração argila
AHP	<i>Analytic Hierarquic Process</i> (Processo de Análise Hierárquica)
AM	Análise Multicritério
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANP	Analytic Network Process
APP	Área de Preservação Permanente
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Térmica Gravimétrica
C	Concentração da solução
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CN	Número da Curva
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
e	Índice de Vazios
Eh	Potencial de oxi-redução
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FDA	Fuzzy Decision Approach
GPS	Global Positioning System
IAEG	International Association of Engineering Geology
IC	Índice de Circularidade
Ic	Índice de Consistência
ICR	Índice de Consistência Randômico
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IGC	Instituto Geográfico do Estado de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LT	Linhas de Transmissão
M	Massa de amostra seca
m	Massa de azul de metileno seco
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique

M_{am}	Massa molecular do azul na forma anidra.
MDT	Modelo Digital de Terreno
MMAD	Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão
N	Número de Avogadro;
n	Porosidade
N.A.	Nível d'Água subterrânea
OSBRA	Oleoduto São Paulo – Brasília
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIs	Planos de Informação
RC	Razão de Consistência
RMS	Root Mean Square Error
SCS-USDA	Soil Conservation Service – United States Department of Agriculture
SE	Superfície Específica do material
S_{EA}	Superfície Específica recoberta por 1ml da solução de azul de metileno
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SigRH	Sistema de Informações para o Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo
Sr	Grau de Saturação
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TIN	Triangular Irregular Network
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UTB's	Unidades Territoriais Básicas
UTM	Projeção Universal Transversa de Mercator
V	Volume de azul de metileno gasto
Vb	Valor de azul de metileno
W	Teor de umidade
ρ	Massa específica
pd	Massa específica seca
ρ_s	Massa específica dos sólidos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS	18
2. ÁREA DE ESTUDO	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. FRAGILIDADE AMBIENTAL E TERMOS RELACIONADOS	22
3.2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	30
3.3. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	42
3.4. PROCESSOS DO MEIO FÍSICO	44
3.4.1. EROSÃO PLUVIAL	44
3.4.2. MOVIMENTOS DE MASSA	46
3.4.3. CORROSIVIDADE	46
3.4.4. COLAPSIVIDADE	47
3.4.5. ESCOAMENTO SUPERFICIAL	47
3.4.6. CHUVAS INTENSAS	50
3.5. MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE APOIO À DECISÃO	50
3.6. MÉTODO DE PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP)	53
3.7. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG	58
3.8. SIG COMO FERRAMENTA DE MODELAGEM AMBIENTAL	60
4. MÉTODO	62
4.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – CONCEITO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	63
4.2. MÉTODO DE ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL	63
4.3. BASE CARTOGRÁFICA	67
4.4. MAPAS TEMÁTICOS	67
4.4.1. MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT), MAPAS DE DECLIVIDADE E CURVATURA	67
4.4.2. MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS	68
4.4.3. MAPA DE USO E OCUPAÇÃO	68
4.4.4. MAPA DE NÍVEL FREÁTICO	68
4.4.5. MAPA DE CHUVAS INTENSAS MÉDIAS	69
4.4.6. MAPA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	69
4.5. MAPAS DE SUSCETIBILIDADE INTERMEDIÁRIOS	69
4.5.1. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO E A MOVIMENTOS DE MASSA	69
4.5.2. MAPA DE SUSCETIBILIDADE AO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	70
4.5.3. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO E AO COLAPSO	70
4.5.4. MAPA DE SUSCETIBILIDADE DOS FATORES BIÓTICOS E SOCIOECONÔMICOS	70
4.5.5. MAPA DE SUSCETIBILIDADE A CHUVAS INTENSAS	70
4.6. VISTORIAS DE CAMPO	71
4.7. ENSAIOS DE LABORATÓRIO	71
4.7.1. ENSAIOS GEOTÉCNICOS	72
4.7.2. ENSAIOS QUÍMICOS	72
4.7.3. ENSAIOS MINERALÓGICOS	72

4.8. MATERIAIS	76
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
5.1. CONCEITO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	78
5.2. BASE CARTOGRÁFICA	79
5.3. MAPAS TEMÁTICOS	79
5.3.1. MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT), MAPAS DE DECLIVIDADE E CURVATURA	79
5.3.2. MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS	84
5.3.3. MAPA DE USO E OCUPAÇÃO	87
5.3.4. MAPA DE NÍVEL FREÁTICO	89
5.3.5. MAPA DE CHUVAS INTENSAS MÉDIAS	91
5.3.6. MAPA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	95
5.4. VISTORIAS DE CAMPO	95
5.5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO	99
5.5.1. ENSAIOS GEOTÉCNICOS	99
5.5.2. ENSAIOS QUÍMICOS	105
5.5.3. ENSAIOS MINERALÓGICOS	106
5.6. MAPAS DE SUSCETIBILIDADE INTERMEDIÁRIOS	111
5.6.1. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROÇÃO	111
5.6.2. MAPA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA	119
5.6.3. MAPA DE SUSCETIBILIDADE AO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	126
5.6.4. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO	133
5.6.5. MAPA DE SUSCETIBILIDADE AO COLAPSO	137
5.6.6. MAPA DE SUSCETIBILIDADE DOS FATORES BIÓTICOS E SOCIOECONÔMICOS	142
5.6.7. MAPA DE SUSCETIBILIDADE A CHUVAS INTENSAS	146
5.7. MAPA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	148
5.8. APLICAÇÃO DO MAPA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL NO OLEODUTO	153
6. CONCLUSÕES	155
REFERÊNCIAS	157
APÊNDICES	163
APÊNDICE A – BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL E DOCUMENTAÇÃO.	164
APÊNDICE B – MAPA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL.	165

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de processos geológicos está relacionada à dinâmica natural do planeta, independente da interferência humana. Contudo, devido à ação antrópica intensa esses processos se tornaram muito mais frequentes, podendo ser potencializados pelo uso e ocupação inadequados do solo. Por esse motivo, se faz necessário o uso de ferramentas que auxiliem a descrição e caracterização dos processos geológicos naturais e também dos antrópicos nas diferentes ações de gestão ambiental.

Especialmente em relação aos oleodutos, há possibilidade de ocorrência de eventos perigosos de origem geológico-geotécnica, decorrentes da interação entre os dutos e o terreno. As tensões resultantes da interação (compressão, tração e cisalhamento) podem levar à ruptura dos dutos. Podem também ocorrer vazamentos relacionados ao processo corrosivo do solo. Além disso, a ação antrópica, traduzida pelo uso e ocupação inadequados, pode intensificar a ocorrência desses eventos (Augusto Filho, 2008).

Um conceito que vem sendo utilizado, relativamente há pouco tempo no Brasil, em estudos dos processos geológicos naturais e antrópicos e análises ambientais é o de fragilidade ambiental. Este conceito tem sido utilizado especialmente em estudos para melhorar a gestão ambiental e geotécnica de oleodutos. Contudo, o conceito é utilizado por diferentes autores com diferentes definições, o que pode tornar sua aplicação confusa.

O mapa de fragilidade ambiental consiste no zoneamento do território em diferentes níveis hierárquicos, que representam os diferentes graus de fragilidade. Permite definir quais áreas são mais frágeis e podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente. Tem grande potencial para ser utilizado em estudos de impacto ambiental.

A extensão de dutos no Brasil aumenta a cada ano. Segundo dados do último levantamento realizado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), o Brasil possui uma malha dutoviária com 15.069km de extensão, com 446 dutos que interligam 27 terminais terrestres, 53 aquaviários e 9 centros coletores de álcool. Da extensão total, metade é de oleoduto (para transportar petróleo e seus derivados) e a outra metade é destinada ao transporte de gás natural (gasodutos) (Alves, 2007).

Mesmo com os constantes avanços nos sistemas de segurança operacional, sejam eles relativos à exploração ou ao transporte de petróleo e derivados, a ocorrência de acidentes nesse ramo de atividade ainda é muito frequente (Noernberg, Lana, 2002).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) realiza um controle desde 1980 dos acidentes envolvendo dutos. Dados registrados deste ano até 2006 computam um

total de 178 acidentes. Uma análise da frequência anual desses acidentes indica um aumento entre 1982 e 1999, principalmente entre os anos de 1996 e 1999, após os quais ocorre uma queda (Augusto Filho et al., 2010).

Por esses motivos, acidentes em oleodutos se constituem em importante ameaça para a qualidade ambiental tanto de regiões costeiras, como também de regiões interioranas. E são necessários estudos que permitam melhor gestão de áreas em que se pretende implantar ou que já esteja implantado este tipo de empreendimento. Neste contexto, os estudos de fragilidade ambiental apresentam potencial para realização de tal tarefa.

A presente pesquisa está relacionada ao conceito e a elaboração de mapas de fragilidade ambiental. Com base na revisão bibliográfica realizada, foi adotado um conceito e proposto um método para elaboração do mapa de fragilidade ambiental de uma área, considerando sua aplicação para análise de um empreendimento ou obra civil.

O método proposto apoia-se na atribuição de pesos com aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarquic Process*) para os diferentes atributos considerados (meio físico, biótico e socioeconômico). O método também utiliza um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para estruturar a base de dados, realizar as análises e produzir os mapas necessários.

É importante ressaltar que a análise dos aspectos bióticos e socioeconômicos realizada foi limitada, sendo os processos do meio físico analisados em maior detalhe. Tal fato pode ser justificado, pois a área de concentração da pesquisa é a geotecnia.

O método foi aplicado e avaliado em um setor do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), entre os municípios de São Simão e Cravinhos, estado de São Paulo.

1.1. Objetivos

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar a aplicação do conceito de fragilidade ambiental em estudos geotécnicos e ambientais, em regiões afetadas por empreendimentos e obras civis, em particular dutovias de combustíveis.

O objetivo específico foi o de propor, testar e avaliar os resultados de um método de elaboração de mapas de fragilidade ambiental, considerando um trecho do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA).

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Longitude 48°46'30"W, Latitude 21°27'30"S) compreende 83,99km² e abrange 18,5km de extensão e uma zona de amplitude de 2km de cada lado do oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA), no trecho entre os municípios de São Simão a Cravinhos, no estado de São Paulo (Figura 2.1).

Na Figura, esta área delimitada é apresentada situada dentro das folhas topográficas, na escala 1:10.000, utilizadas. Além disso, são apresentados os limites dos municípios em que se insere e também o oleoduto existente.

Figura 2.1 – Localização da área de estudo.

A topografia local é composta por colinas planas (< 200m) com declividade baixa a média (3 – 7°). A geologia consiste em arenitos eólicos com estratificação cruzada da Formação Botucatu, e derrames basálticos com camadas de arenito (intertrapiano) e intrusões diabásicas da Formação Serra Geral, ambas do Período Jurássico-Cretáceo, sobrepostos por depósitos aluviais e coluviais Cenozóicos.

A área de estudo está contida em uma importante bacia hidrográfica do estado de São Paulo, a Bacia do Rio Pardo. A pluviosidade média da região é de 1350mm/ano. Sendo a estação chuvosa entre Dezembro e Março, quando as temperaturas médias variam entre 22 e 26°C. No período seco (entre Abril e Novembro), as temperaturas médias entre 13 e 16°C (Augusto Filho et al., 2010).

O oleoduto OSBRA é feito de tubos de aço corrugado, de diâmetro nominal de 5,04m. O seguimento de oleoduto estudado foi construído entre 1998 e 1999 utilizando, principalmente, trincheiras abertas, com profundidades entre 1,5 - 2m, e os dutos foram subsequentemente cobertos com preenchimento compactado.

Esse setor foi escolhido, pois já havia uma base digital previamente constituída abrangendo uma extensão de 48,5km, perfazendo uma área de 205,8km², entre os municípios de São Simão e Cravinhos. Sua localização no estado de São Paulo e no Brasil é mostrada na Figura 2.2. A seleção do setor do oleoduto utilizado na pesquisa se motivou pelo fato da área apresentar regiões muito homogêneas em relação a todos os atributos analisados neste trabalho.

Dessa forma, o trecho selecionado é representativos dos tipos de usos, dos materiais inconsolidados, além dos outros atributos analisados. Desta forma, garante-se que será possível verificar a sensibilidade do método para as diferentes características da área.

Além disso, reduzindo-se a área de estudo aumentou-se a densidade dos pontos de coleta de amostras que foram analisadas. Os resultados gerados podem também ser mais facilmente representados em escalas maiores, com maior riqueza de detalhes.

Figura 2.2 – Localização da área de estudo no estado de São Paulo e no Brasil.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fragilidade Ambiental e Termos Relacionados

Cada vez mais são necessárias ferramentas que auxiliem a gestão ambiental e geotécnica dos diferentes processos naturais e antrópicos que podem ocorrer no meio ambiente. Neste contexto, os conceitos de risco, vulnerabilidade, suscetibilidade e sensibilidade são importantes.

Segundo Cerri e Amaral (1998), risco geológico pode ser definido como uma situação de perigo, perda ou dano, ao homem e suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processo geológico, induzido ou não. Risco pode ainda ser definido como uma forma de expressar o perigo em termos de danos por tempo, normalmente utilizando uma unidade monetária.

De acordo com o Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa (1995), suscetibilidade é definida como qualidade de suscetível, sendo suscetível aquilo que é passível de receber impressões, modificações ou adquirir qualidades.

Define-se também o conceito de suscetibilidade de uma área com relação a determinado fenômeno geológico, que caracteriza a possibilidade de sua ocorrência (evento) (Cerri, Amaral, op. cit.). Já Art (2001), define suscetibilidade como o grau de vulnerabilidade apresentado pelos sistemas ambientais diante de ameaças ou agressão a um ou mais de seus componentes.

Segundo Zuquette (1993), vulnerabilidade corresponde à predisposição de um sistema ou elemento, que está exposto a um evento perigoso, em ser afetado ou estar suscetível a sofrer perdas ou danos. Já para Pereira (2002), vulnerabilidade é a suscetibilidade de um compartimento, solo ou água, por exemplo, ser adversamente afetado por uma carga contaminante qualquer.

Em termos gerais, a vulnerabilidade expressa o grau de perda de um ou mais elementos sob risco, dada a ocorrência de um fenômeno natural ou antrópico. Pode variar de 0 a 1, correspondendo a nenhuma perda ou perda total, respectivamente.

Outro conceito importante a ser definido é o de vulnerabilidade ambiental. Ele consiste em qualquer conjunto de fatores ambientais de mesma natureza que, diante de atividades que estão ocorrendo ou que venham a ocorrer, poderá sofrer adversidades e afetar, de forma total ou parcial, a estabilidade ecológica da região em que ocorre (Andersen, Gosk, 1987).

Já a sensibilidade é definida como propriedade do organismo vivo de perceber modificações do meio externo ou interno e de reagir a elas de maneira adequada. Além disso, também pode ser definida como suscetibilidade (Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa, 1995).

Outro conceito que vem sendo utilizado, relativamente há pouco tempo no Brasil, em estudos dos processos geológicos naturais e antrópicos é o de fragilidade ambiental. Contudo, este conceito, da forma que vem sendo utilizado, muitas vezes se confunde com outros dos conceitos definidos acima.

A palavra fragilidade provém do latim *fragilitatis* e é definida como caráter daquilo que é frágil, sendo frágil o que se pode danificar ou deteriorar facilmente, ou ainda, aquilo que é vulnerável (Larousse Cultural, 1998).

Pela própria definição do dicionário já é possível perceber que o conceito de fragilidade remete ao de vulnerabilidade, o que já indica que é possível que os termos se confundam. Por este motivo, buscaram-se na literatura científica definições e aplicações do conceito de fragilidade ambiental de forma a esclarecer as origens e o significado considerado mais adequado do conceito. A Tabela 3.1 apresenta as principais delas.

Ratcliffe (1971) descreve fragilidade como uma medida da sensibilidade intrínseca de um ecossistema às pressões ambientais (especialmente mudanças de gestão), combinada com a exposição à ameaça que poderia perturbar o equilíbrio existente. Este conceito foi utilizado no contexto de seleção de reservas naturais.

De acordo com Ratcliffe (1977), a fragilidade ecológica reflete o grau de sensibilidade de um habitat às mudanças ambientais e, conseqüentemente, representa a combinação de fatores internos e externos.

A fragilidade ecológica está relacionada com a ocorrência de eventos que podem potencialmente determinar modificações desfavoráveis no habitat. Particularmente, a fragilidade ecológica de um habitat é determinada pela combinação da sensibilidade ecológica e o real nível de eventos desfavoráveis nele.

Ainda no contexto de seleção de reservas naturais, Smith e Theberge (1986) definem fragilidade como o oposto à estabilidade. E a estabilidade reflete a velocidade com que um sistema retorna ao equilíbrio após uma perturbação.

Ou seja, quanto mais estável, mais rápido o sistema retornará à condição de equilíbrio. Os autores ainda destacam que a fragilidade pode ser natural ou induzida pelo ser humano e que a natural pode ser devida a fatores internos ou externos.

Tabela 3.1 – Principais definições de Fragilidade, em estudos ambientais, encontradas na literatura científica.

Termo	Autor	Definição
Fragilidade	Ratcliffe, 1971	Medida da sensibilidade intrínseca de um ecossistema às pressões ambientais (especialmente em mudanças de gestão), combinada com a exposição à ameaça que poderia perturbar o equilíbrio existente.
Fragilidade Ecológica	Ratcliffe, 1977	Reflete o grau de sensibilidade de um habitat às mudanças ambientais e, conseqüentemente, representa a combinação de fatores internos e externos.
Fragilidade	Goldsmith, 1983	Elevada sensibilidade inerente. Distingue fragilidade e vulnerabilidade, assumindo que uma área é inerentemente frágil, mas é vulnerável a uma ameaça externa, como a mudança no uso.
Fragilidade	Smith e Theberge, 1986	O oposto a estabilidade. A estabilidade reflete a velocidade com que um sistema retorna ao equilíbrio após uma perturbação. A fragilidade pode ser natural ou induzida pelo ser humano e a natural pode ser devida a fatores internos ou externos.
Fragilidade	Nilsson e Grelsson, 1995	Propriedade inerente de um ecossistema, ou seja, ecossistemas possuem certa fragilidade estando sujeitos ou não a perturbações. Esta fragilidade é impossível de ser quantificada, possuindo apenas significado metafísico. A única fragilidade que pode ser observada é aquela resultante de perturbações, naturais ou causada pela ação antrópica.
Fragilidade inerente	Nilsson e Grelsson, 1995	Propriedade inerente de um ecossistema, ou seja, um ecossistema apresenta certa fragilidade esteja ou não exposto a perturbações (impossível de ser quantificada).
Fragilidade exibida	Nilsson e Grelsson, 1995	Fragilidade que podemos observar. É em decorrência de perturbações naturais ou antrópicas operantes no sistema.
Fragilidade Ecológica	Guan et al., 2007	Sinônimo de vulnerabilidade, caracterizada por características de baixa capacidade ambiental, elevada variação de sensibilidade e uma estabilidade inferior.
Fragilidade Ambiental	Pecci, 2009	É correlacionada ao correspondente grau de pressão humana atuante no habitat. A pressão antrópica (perturbação) é considerada como o conjunto de pressões (poluição, transformações) que atuam na unidade ambiental, sendo internas ou externas.
Fragilidade Potencial	Ross, 1994	Indica os graus de fragilidade, sob a ação dos processos morfogenéticos atuantes na paisagem, resultantes da correlação de alguns dos componentes físico-naturais da paisagem: declividade do terreno, índice de dissecação do relevo e cobertura pedológica.
Fragilidade Emergente	Ross, 1994	Correlaciona às informações resultantes da fragilidade potencial com as informações de uso do solo.
Fragilidade Ambiental	Fierz, 2008	Concebe o termo a partir dos conceitos relacionados aos preceitos da teoria geral dos sistemas, nos quais os elementos naturais são considerados em interação mútua, sendo a fragilidade ambiental representada pelas possíveis quebras na interação entre elementos do sistema natural.

Uma analogia pode ser feita para melhor esclarecer o conceito, que pode ser visualizado por uma bola em uma tigela. No equilíbrio, a bola encontra-se no fundo da tigela, e se a bola for deslocada irá retornar à posição de equilíbrio. A taxa com que a bola retorna a posição inicial é uma função de quão longe é deslocada e do formato da tigela. Pela analogia, isto representa uma maior ou menor fragilidade do sistema e o respectivo grau de interferência (Smith, Theberge, 1986).

Segundo os autores supracitados, o meio predominante para se avaliar a fragilidade é observá-la em relação a uma perturbação específica e as características que serão mais afetadas. Neste caso, a análise envolve essencialmente a estimação do risco e se insere na esfera de avaliação de impacto ambiental.

Estas definições consideram fragilidade como o nível potencial de desestabilização de um ecossistema, dada uma perturbação, que pode ser natural ou antrópica. E que para ser avaliada deve ser identificada a perturbação em questão e os principais atributos que poderão ser afetados, tanto bióticos (fauna, flora) como abióticos (solo, recursos hídricos, etc.), dependendo do caso.

Goldsmith (1983) define uma área frágil como uma área com elevada sensibilidade inerente, como uma área alagada, uma duna costeira e regiões montanhosas, que apresentam potencial para ser fisicamente instáveis.

É feita ainda a distinção entre fragilidade e vulnerabilidade, assumindo que uma área é inerentemente frágil, mas é vulnerável a uma ameaça externa como a mudança no uso do solo ou extração de cascalho, por exemplo. Dessa forma, o autor sugere que a fragilidade é uma característica natural, enquanto a vulnerabilidade reflete a influência dos fatores externos (Goldsmith, op. cit.).

De acordo com a definição deste autor, fragilidade é aquela devida apenas a fatores intrínsecos e esta fragilidade associada a perturbações provocadas por ações antrópicas é a vulnerabilidade do meio ambiente.

Nilsson e Grelsson (1995) consideram fragilidade como uma propriedade inerente de um ecossistema, ou seja, ecossistemas possuem certa fragilidade estando sujeitos ou não a perturbações. Esta fragilidade, chamada inerente, é impossível de ser quantificada, possuindo apenas significado metafísico.

A única fragilidade que pode ser avaliada é aquela resultante de perturbações, naturais ou causada pela ação antrópica, chamada de fragilidade exibida. Portanto, relacionar ecossistemas com as perturbações que nele ocorrem pode fornecer avaliações

úteis, em uma abordagem intimamente relacionada à avaliação de impactos ambientais (Nilsson, Grelsson, 1995).

Os autores acima consideram que a fragilidade deve ser preferivelmente entendida não como relativa a uma situação natural, intrínseca, mas sim em um sentido mais tangível e físico, no qual representa o grau de sensibilidade dos habitats, comunidades e espécies às mudanças ambientais e, portanto, envolve a combinação de fatores internos e externos.

Os autores supracitados ainda definem fragilidade como o inverso de estabilidade, termo que também pode gerar confusão. Em outras palavras, alta fragilidade equivale à baixa estabilidade, e vice versa.

A complexidade do conceito de fragilidade (ou estabilidade) leva a diversos problemas em sua avaliação. Em primeiro lugar, os diferentes aspectos da fragilidade não estão necessariamente inter-relacionados.

Portanto, um ecossistema pode ser relativamente frágil para um aspecto e relativamente estável para outro. Em segundo lugar, os vários aspectos da fragilidade não são facilmente quantificados, e a fragilidade como um todo ainda menos. Em terceiro lugar, a fragilidade de um ecossistema pode variar com a escala (temporal e espacial) (Nilsson, Grelsson, op. cit.).

No contexto da ecologia, fragilidade e estabilidade de um ecossistema relacionam-se com o grau de mudança na abundância e na composição de espécies, em virtude de perturbações.

Altas taxas de alterações de espécies ou flutuações de populações caracterizam ecossistemas frágeis, e vice versa. A diversidade de processos ecológicos relacionados a estas mudanças tornam a fragilidade um critério de avaliação central nas práticas de conservação ambiental (Nilsson, Grelsson, op. cit.).

Guan et al. (2007) elaboraram um estudo de fragilidade ambiental em regiões cársticas na China, no qual consideram os conceitos de fragilidade e vulnerabilidade como sinônimos. Consideram como características de um sistema frágil a baixa capacidade ambiental, a elevada variação de sensibilidade e um nível de estabilidade inferior.

Os autores acima consideram que devem ser ponderados fatores de influência específicos para o problema ambiental em questão, de forma a possibilitar a criação de um índice de fragilidade que sirva como base para restauração e reconstrução dos ecossistemas cársticos degradados.

Segundo Pecci (2009), na literatura científica não existe uma única abordagem ao conceito de fragilidade, sendo duas abordagens as que mais se destacam:

- Alguns autores fazem a distinção entre áreas que são frágeis como consequência de grandes mudanças naturais internas e áreas modificadas principalmente por pressões externas, especialmente as que têm origem antrópica;
- Outros autores incluem no conceito de fragilidade fatores externos e internos, sendo eles naturais ou antrópicos;

Estas abordagens não são necessariamente contraditórias, pois locais inerentemente frágeis, principalmente governados por processos internos, podem ser considerados mais suscetíveis a pressões externas do que outros locais.

Apoiando-se nos conceitos apresentados por Ratcliffe (1971, 1977), Pecci (2009) define fragilidade ecológica como sendo correspondente ao grau de pressão humana atuante no habitat. A pressão antrópica (perturbação) é considerada como o conjunto de pressões (poluição, transformações) que atuam na unidade ambiental, sendo internas ou externas.

No Brasil, Ross (1994) introduziu o conceito de fragilidade ambiental em seu estudo intitulado *Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados*. O autor afirma que a fragilidade dos ambientes naturais, dada uma intervenção antrópica, depende de suas características genéticas. A princípio, os ambientes naturais se encontravam em equilíbrio dinâmico até o início progressivo das intervenções humanas na exploração de recursos naturais.

Ross (op. cit.) baseou-se no conceito de Unidades Ecodinâmicas preconizado por Tricart (1977) para avaliar as fragilidades dos ambientes naturais. Definiu as Unidades Ecodinâmicas Instáveis (Instabilidade Emergente) como sendo aquelas cujas intervenções antrópicas modificaram intensamente os ambientes naturais.

Já as Unidades Ecodinâmicas Estáveis (Instabilidade Potencial) são as que estão em equilíbrio dinâmico e foram poupadas da ação humana, encontrando-se em seu estado natural.

De acordo com Ross (op. cit.), a carta de fragilidade potencial indica os graus de fragilidade, sob a ação dos processos morfogenéticos atuantes na paisagem, resultantes da correlação de alguns dos componentes físico-naturais da paisagem: declividade do terreno, índice de dissecação do relevo e cobertura pedológica.

E a carta de fragilidade emergente correlaciona às informações resultantes da fragilidade potencial com as informações de uso do solo, indicando os graus de fragilidade das unidades espaciais conforme as condições de proteção do solo.

Esta definição é semelhante à proposta por Nilsson e Grelsson (1995) de fragilidade inerente e exibida. Contudo, Ross (op. cit.) apenas considera alguns componentes do meio físico e os relaciona com o uso e ocupação, que representam os fatores bióticos. Dessa forma, este índice desconsidera alguns fatores físicos e bióticos que poderiam ser importantes para a análise.

Rocha e Fernandes (2007) realizaram o estudo de fragilidade a escorregamentos, no qual consideram como fatores de fragilidade do meio físico o domínio geológico fortemente falhado e fraturado, as acentuadas declividades, o desmatamento e a ocupação desordenada.

Os autores supracitados consideram fatores condicionantes dos escorregamentos para elaboração da carta de fragilidade como o mapa de litologia, de intensidade de lineamentos estruturais e a carta de declividade. Os autores também propõem os termos de Fragilidade Geotécnica e Fragilidade Geológica, que são intermediários para a geração da carta de risco.

Fierz (2008) concebe o termo fragilidade ambiental a partir dos conceitos relacionados aos preceitos da teoria geral dos sistemas, nos quais os elementos naturais são considerados em interação mútua, identificando o caráter sistêmico pelo sentido de "o todo é mais que a soma das partes". Dessa forma, a autora explicita a fragilidade ambiental pelas possíveis quebras na interação entre elementos do sistema natural.

Esta definição remete à de Ross (1994) na medida em que considera a desestabilização do equilíbrio dinâmico como fragilidade. O que se verifica no Brasil é que a grande maioria das metodologias de avaliação de fragilidade é baseada ou adaptada daquela proposta por Ross (op. cit.).

Percebe-se que há uma confusão geral dos termos relacionados à fragilidade ambiental, tanto internacionalmente quanto nacionalmente. Muitas vezes os termos são considerados sinônimos, o que pode ser entendido, uma vez que as próprias definições do dicionário para as palavras fragilidade, sensibilidade, vulnerabilidade e suscetibilidade são muito similares.

Na maioria dos casos em que se procura diferenciar esses termos, os autores acabam sendo incoerentes com as definições. Um exemplo é denominar de fragilidade ambiental algo que considera apenas alguns aspectos físicos e bióticos do meio ambiente.

Além disso, o que se verifica é que os primeiros registros de definição e utilização do conceito de fragilidade ambiental são contemporâneos à época em que os outros termos mais bem difundidos atualmente (suscetibilidade, vulnerabilidade, etc.) estavam se

consolidando. Ao que tudo indica, é que com o decorrer do tempo, o conceito de fragilidade ambiental acabou sendo pouco utilizado e não se consolidou como os outros.

Observando as primeiras definições para o termo fragilidade encontradas na literatura científica internacional, verifica-se um consenso de que a fragilidade de um ambiente se traduz pela desestabilização de um equilíbrio dinâmico preexistente. As divergências das definições se encontram nos fatores que causam este desequilíbrio.

Alguns autores consideram que a fragilidade é devida a fatores internos e externos, enquanto outros consideram que é apenas devido a fatores internos, sendo uma propriedade intrínseca do sistema e difícil de ser quantificada.

Na linha de pensamento que a fragilidade é causada apenas por fatores internos, há inclusive uma definição que relaciona fragilidade e vulnerabilidade. A distinção entre os dois conceitos ocorre na medida em que a fragilidade é uma propriedade inerente e a vulnerabilidade é em decorrência de um fator externo, como alterações de uso e ocupação.

Quanto aos autores que defendem que a fragilidade é devida a fatores internos e externos, estes afirmam que devem ser considerados fatores naturais (bióticos e abióticos) e antrópicos (uso e ocupação e indicadores socioeconômicos) para ser possível quantificar a fragilidade do ambiente.

Além disso, defendem a importância de que a avaliação da fragilidade seja flexível e, que permita ser avaliada de uma forma específica para cada caso. Ou seja, que se considerem fatores específicos em função da região que está sendo estudada e também os tipos de impactos estudados.

Do termo fragilidade existem várias derivações como fragilidade ecológica, fragilidade ambiental, fragilidade inerente, fragilidade exibida, etc. Estes conceitos foram aplicados em diferentes situações como seleção de áreas naturais, avaliação de ecossistemas, seleção de áreas para empreendimentos e planejamento ambiental.

No Brasil, o conceito foi introduzido há relativamente pouco tempo e a principal definição adotada por diversos autores em diferentes tipos de estudo divide o termo fragilidade em dois.

A fragilidade potencial, que indica uma propriedade inerente do ambiente pela ação de processos morfogenéticos, resultantes da correlação de alguns dos componentes físico-naturais da paisagem. E a fragilidade emergente, que relaciona o resultado da fragilidade potencial com informações de uso e ocupação do solo.

Esta definição se alinha com aquela que define que a fragilidade é causada por fatores internos e externos. Entretanto, leva em consideração apenas alguns fatores naturais do meio físico (relevo e solos) e fatores bióticos traduzidos pelo mapa de uso e ocupação.

Além disso, os fatores considerados são sempre os mesmos, independentes da área de estudo ou impacto analisado. Desta forma, a flexibilidade na avaliação da fragilidade que é defendida por autores da literatura internacional não é atingida.

Na verdade, em função dos fatores considerados, a avaliação de fragilidade ambiental amplamente utilizada no Brasil se parece muito mais com uma avaliação da suscetibilidade à erosão.

A presente pesquisa adota como definição que a fragilidade ambiental reflete o grau de desestabilização do equilíbrio dinâmico do meio ambiente causada apenas por fatores intrínsecos (físicos, bióticos e socioeconômicos), considerando o momento em que o estudo é realizado. Ou seja, os usos e ocupações antrópicos já existentes no momento do estudo devem ser considerados como internos ao sistema.

3.2. Métodos de Avaliação dos Níveis de Fragilidade Ambiental

Assim como definições para o conceito de fragilidade existem vários métodos para avaliar os níveis de fragilidade ambiental. Os principais foram agrupados e são mostrados na Tabela 3.2.

Nilsson e Grelsson (1995) sugerem uma forma de identificar, classificar e delimitar áreas frágeis. A ideia desta abordagem é que a aplicação da fragilidade pode ser formalizada, mas que considerações especiais devem ser tomadas para cada região, dependendo das variações das estruturas do ecossistema e do regime de perturbação.

Além disso, a maior parte das previsões encontradas na literatura se refere a curtos períodos de tempo e a áreas geográficas limitadas. Já que fatores locais são importantes, a extrapolação para outras áreas se torna difícil, fazendo com que a avaliação da fragilidade ecológica seja uma necessidade constante.

Esta avaliação pode ser feita através de uma matriz onde cada célula deve ser preenchida com a previsão do efeito da perturbação no ecossistema. A soma dos resultados da matriz perturbação/ecossistema compreende a base para a avaliação da fragilidade exibida.

Tabela 3.2 – Principais Métodos para quantificação da fragilidade em estudos ambientais.

Autor	Variáveis	Atributos	Método	Aplicação
Nilsson e Grelsson, 1995	Meio Físico, Biótico e Socioeconômico.	Devem ser específicos em função da região e impactos estudados.	Elaboração de uma matriz onde cada célula será preenchida com um fator de efeito para cada atributo no ecossistema. Em seguida, os valores para cada atributo são somados e a fragilidade exibida é obtida.	-
Rossi, 2001	Meio Físico e Biótico.	-	Elaboração de um gráfico confrontando a sensibilidade natural com a pressão antrópica, permitindo obter o grau de fragilidade ecológica.	-
Guan et al., 2007	Meio Físico, Biótico e Socioeconômico.	Superfície exposta de rochas carbonáticas, Área de regiões montanhosas, Declividade, Grau de desertificação (leve, moderado ou severo), Cobertura vegetal, Perda de água e solo, Módulo de erodibilidade, Volume de escorregamentos, Índice de cultivo, Área agricultável per capita e Densidade de população agrícola.	Atribuição de pesos aos atributos pelo Processo Analítico Hierárquico (AHP), seguida de avaliação pela lógica fuzzy e classificação final utilizando GIS.	Subsidiar a recuperação e reconstrução de ecossistemas cársticos degradados na China.
Ross, 1994	Meio Físico, Biótico e Socioeconômico	Índice de Dissecção do Relevo, Tipos de solo, Uso e cobertura vegetal.	Ponderação de 1 a 5 para cada atributo analisado; combinação dos planos de informação gerados e classificação da fragilidade ambiental com o primeiro dígito sendo determinante.	Subsídio ao planejamento ambiental.
Ross, 1994	Meio Físico, Biótico e Socioeconômico	Declividade, Tipos de solo, Uso e cobertura vegetal.	Ponderação de 1 a 5 para cada atributo analisado; combinação dos planos de informação gerados e classificação da fragilidade ambiental com o primeiro dígito sendo determinante.	Subsídio ao planejamento ambiental.
Crepani et al., 1996	Meio Físico e Biótico.	Imagens de Satélite TM-Landsat, Mapa geológico, Geomorfológico, Pedológico e Cobertura vegetal.	Interpretação das imagens de satélite (padrões fotográficos, variações de cores, textura, forma, padrões de drenagem e relevo); associação do resultado com os dados temáticos preexistentes; atribuição de notas de 1,0 a 3,0.	Subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia.
Rocha e Fernandes, 2007	Meio Físico.	Mapas de Litologia, Intensidade de Lineamentos Estruturais e Carta de Declividade.	Pré-geoprocessamento, com aquisição de dados em laboratório; geoprocessamento dos dados (ponderações), com obtenção de seus produtos e checagem em campo.	Avaliação de risco à ocorrência de eventos de escorregamentos de massa.

O ecossistema propenso a ser afetado pela maioria das perturbações, ou pelo menos ser fortemente afetado por pouca perturbação, pode ser considerado o mais frágil. Antes de uma avaliação final da fragilidade ecológica, potenciais interações entre impactos devem ser consideradas para que uma contagem dupla não seja introduzida, quando o efeito de um impacto se sobrepuser ao de outro.

Este método é flexível, na medida em que a matriz pode (na verdade, deve) ser confeccionada para regiões específicas, e pode também ser atualizada quando impactos reais ou ameaças mudarem de intensidade. A maior dificuldade pode residir na previsão dos efeitos de várias perturbações. Para reduzir este problema, as previsões devem representar o julgamento conjunto de vários especialistas, representando um grupo multidisciplinar.

A literatura científica apresenta um consenso geral na identificação dos eventos desfavoráveis com impacto negativo das atividades humanas (pressão antrópica) nos habitats. Baseado nisso, Rossi (2001) propôs um modelo conceitual mostrado na Figura 3.1.

A fragilidade ecológica é relacionada ao correspondente grau de pressão humana atuante no habitat. A pressão antrópica (perturbação) é considerada como o conjunto de pressões (poluição, transformações) que atuam na unidade ambiental, sendo internas ou externas.

Figura 3.1 – Modelo conceitual para quantificação da fragilidade. Adaptado de Rossi (2001) apud Pecci (2009).

Este conceito pode ser modelado matematicamente pela Equação 3.1.

$$F.E. = \alpha * P.A. \quad (3.1)$$

Onde F.E. representa o grau de fragilidade do habitat utilizando uma escala arbitrária semi-quantitativa; α é o coeficiente específico de fragilidade (ou seja, a sua sensibilidade) e expressa a modificação da fragilidade resultante da variação da pressão antrópica; P.A. é a pressão antrópica atuante e é mensurada utilizando a adequada escala semi-quantitativa.

Em uma primeira abordagem, pode ser assumida uma relação linear entre a fragilidade ecológica e a pressão antrópica. Sua tendência de aumento expressa o consenso referente ao efeito negativo da pressão antrópica na fragilidade. Por esta razão, dois sistemas diferentes podem apresentar o mesmo nível de fragilidade de acordo com os diferentes níveis de pressão humana, como consequência das diferentes sensibilidades.

Matematicamente, a sensibilidade quantitativamente expressa pelo coeficiente α , desempenha o papel de multiplicador entre fragilidade e pressão antrópica. Como consequência, um habitat pode estar sujeito a uma pressão antrópica moderada, mas possuir elevada sensibilidade. E, conseqüentemente, apresentar elevada fragilidade. Contrariamente, uma baixa sensibilidade pode determinar moderada fragilidade, em condições de elevada pressão.

É importante ressaltar que a equação da reta, proposta pelo autor, considera que se a pressão antrópica for nula a fragilidade será zero (reta passando pela origem). Porém, essa consideração não está completamente correta, pois mesmo sem ação humana haverá algum nível de fragilidade no meio ambiente.

No estudo desenvolvido por Guan et al. (2007) foram selecionados 25 municípios de Chongqing (China) como exemplos. Foi aplicado um método de classificação quantitativa para estabelecer um índice de avaliação da fragilidade ecológico ambiental. Os fatores de influência foram selecionados pela experiência dos pesquisadores, e abrangeram integradamente fatores do meio físico, biótico e socioeconômico.

No sistema, aos índices são atribuídos pesos pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP). Em seguida, um modelo de avaliação é estabelecido pela generalização matemática *fuzzy*. Finalmente, é realizada uma classificação final utilizando-se Sistema de Informação Geográfica (SIG).

A aplicação do trabalho é voltada a explorar o método de avaliação quantitativa da fragilidade ecológico ambiental de áreas cársticas em Chongqing. Além de gerar uma classificação da fragilidade, visando subsidiar a recuperação e reconstrução de ecossistemas cársticos degradados.

O método utiliza perturbações naturais e antrópicas nas áreas cársticas, e seleciona 13 fatores de influência como índices de avaliação.

Esses fatores são: superfície exposta de rochas carbonáticas, área de regiões montanhosas, declividade, grau de desertificação (leve, moderado ou severo), cobertura vegetal, perda de água e solo, módulo de erodibilidade, volume de escorregamentos, índice de cultivo, área agricultável per capta e densidade de população agrícola, para estabelecer um sistema de índice de avaliação, como é mostrado na Figura 3.2.

Os autores classificam o índice de fragilidade em cinco categorias (potencialmente frágil, levemente frágil, moderadamente frágil, seriamente frágil e extremamente frágil) de acordo com a divisão entre o máximo e mínimo valor de cada índice.

Figura 3.2 – Sistema de indicadores de avaliação de vulnerabilidade ecológica. Adaptado de Guan et al. (2007).

Devido ao fato de que cada indicador exerce diferentes funções no sistema de índice, a extensão da influência deles para a fragilidade ecológico ambiental é diferente. O método de ponderação é utilizado para definir a influência dos indicadores. Neste método, os autores utilizam o processo analítico hierárquico (AHP) para determinar o peso de cada índice de fragilidade ecológico ambiental.

Segundo os autores, a fragilidade ecológico ambiental apresenta uma graduação na área cárstica estudada. Ou seja, o ambiente não se apresenta absolutamente frágil, nem absolutamente estável.

Portanto, a avaliação da fragilidade da área pode ser tratada com uma solução matemática *do tipo fuzzy*. E o grau de pertinência para algum nível de fragilidade será principalmente calculado pelo estabelecimento de uma função, de acordo com o valor do índice de avaliação.

Seguindo a formulação matemática *fuzzy*, primeiramente a fragilidade é avaliada quanto a perturbações naturais e antrópicas. Em seguida, utiliza o resultado como fator de avaliação e, finalmente, são obtidas as classificações da fragilidade ecológico ambiental dos 25 municípios cársticos em Chongqing. Para ilustrar o que pode ser obtido com esta metodologia, o resultado do trabalho dos autores é mostrado na Figura 3.3.

No Brasil, Ross (1994) propõe o “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com Apoio nos Índices de Dissecação do Relevo”. Segundo o autor, as unidades de fragilidade dos ambientes naturais devem ser resultantes dos levantamentos básicos de geomorfologia, geologia, pedologia, uso e cobertura vegetal. O tratamento integrado desses levantamentos permite que se obtenha um diagnóstico com diferentes classes hierárquicas de fragilidade (Spörl, Ross, 2004).

Em seu modelo, o autor hierarquiza os elementos em cinco classes de acordo com sua fragilidade, resultando em classes com fragilidade muito baixa com valor 1, baixa com valor 2, média com valor 3, alta com valor 4 e muito alta com valor 5. Para definição dos índices de dissecação do relevo é elaborada a matriz mostrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Matriz dos Índices de Dissecação do Relevo (Ross, 1994).

Densidade de Drenagem	Muito Baixa (1) >3750m	Baixa (2) 1750 a 3750m	Média (3) 750 a 1750m	Alta (4) 250 a 750m	Muito Alta (5) <250m
Graus de Entalhamento	>15mm	15mm	5mm	1 a 3mm	1mm
Muito Fraco (1) (<20m)	11	12	13	14	15
Fraco (2) (20 a 40m)	21	22	23	24	25
Médio (3) (40 a 80m)	31	32	33	34	35
Forte (4) (80 a 160m)	41	42	43	44	45
Muito Forte (5) (>160m)	51	52	53	54	55

Dessa forma, a classificação das categorias morfométricas é feita da seguinte maneira:

- Muito Fraca (1) – 11;
- Fraca (2) – 12, 21, 22;
- Média (3) – 13, 23, 31, 32, 33;
- Forte (4) – 14, 24, 34, 41, 42, 43, 44;
- Muito Forte (5) – 15, 25, 35, 45, 51, 52, 53, 54, 55.

A classificação dos solos é feita conforme mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Classes de fragilidade para solos (Ross, 1994).

Classes de Fragilidade	Tipos de Solo
Muito Baixa (1)	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho amarelo com textura argilosa.
Baixa (2)	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo com textura media/argilosa.
Média (3)	Latossolo Vermelho amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho amarelo com textura media/argilosa.
Forte (4)	Podzólico Vermelho amarelo com textura media/arenosa.
Muito Forte (5)	Cambissolos Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas.

O mapa de uso e cobertura é elaborado pela interpretação de imagens de satélite ou fotografias aéreas (dependendo da escala). Então é classificado em graus de proteção aos solos, obedecendo em ordem crescente de capacidade de proteção, conforme mostrado na Tabela 3.5.

A classificação da fragilidade é feita pela composição entre estes Planos de informação (PIs) gerados e composta pelos Algarismos descritos acima. O primeiro é relativo ao relevo, o segundo ao solo e o terceiro à cobertura vegetal/uso da terra (Spörl, Ross, 2004).

Tabela 3.5 – Graus de proteção da cobertura vegetal (Ross, 1994).

Graus de Proteção	Tipos de Cobertura Vegetal
Muito Alta (1)	Florestas/Matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade.
Alta (2)	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso, formações arbustivas densas (mata secundária, Cerrado denso, Capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa, Pastagens cultivadas com baixo pisoteio de gado, cultivo de ciclo longo como o cacau.
Média (3)	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas, pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas.
Baixa (4)	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta do reino, laranja com solo exposto entre ruas), culturas de ciclo curto (arroz, feijão, trigo, soja, milho, algodão com cultivo em curvas de nível/terraceamento).
Muito Baixa a nula (5)	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplenagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas.

Através da combinação desses algarismos (111, 123, 413, 555, etc.), os graus de fragilidade natural são definidos. Dessa forma, o conjunto de algarismos 111 representa todas as variáveis favoráveis (fragilidade muito baixa), e o conjunto de algarismos 555 representa todas as variáveis desfavoráveis (fragilidade muito alta).

Pelos procedimentos técnico-operacionais do modelo a variável determinante para o grau de fragilidade da área a ser analisada é o índice de dissecação do relevo (1º dígito). As outras variáveis definem uma hierarquização através de seus coeficientes de fragilidade.

A variável cobertura vegetal irá identificar através de seus índices as áreas onde o equilíbrio dinâmico foi perdido, resultando em situações de risco e as áreas onde a estabilidade continua imperando (Spörl, Ross, 2004).

Ross (1994) também propõe o Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade. O procedimento utilizado para geração desta carta é uma variação do modelo descrito anteriormente. Neste modelo, são utilizadas classes de declividade ao invés dos índices de dissecação do relevo para gerar a carta de fragilidade ambiental.

Os intervalos das classes de declividades foram estabelecidos a partir dos valores já utilizados em estudos de Capacidade de Uso e Aptidão Agrícola associados com aqueles conhecidos como valores limites críticos de Geotecnia. Eles indicam respectivamente, o vigor dos processos erosivos, os riscos de escorregamentos/deslizamentos e inundações frequentes. Portanto, a hierarquização das classes é mostrada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Classes de declividade (Ross, 1994).

Declividade (%)	Classe
< 6	Muito Baixa
6 a 12	Baixa
12 a 20	Média
20 a 30	Alta
> 30	Muito Alta

As variáveis solo e cobertura vegetal/uso da terra mantêm os mesmos parâmetros aplicados para o modelo anterior.

A classificação destas variáveis de acordo com sua fragilidade compõe, assim como no modelo anterior, uma combinação numérica representada por três dígitos. O primeiro relacionado à declividade, o segundo ao solo e o terceiro à cobertura vegetal (Spörl, Ross, 2004).

Também como no modelo anterior, estes três dígitos representam as características de cada variável presente numa determinada área. O 1º dígito da combinação entre as variáveis irá sempre definir o grau de fragilidade para a área. A variável cobertura vegetal/uso da terra irá classificar estas áreas como estáveis ou instáveis, apontando nuances desta instabilidade (Spörl, Ross, op. cit.).

Crepani et al. (1996) desenvolveram o Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio em Unidades Territoriais Básicas (UTB's), com objetivo de elaborar mapas de vulnerabilidade natural à erosão.

A metodologia foi desenvolvida baseada no conceito de Ecodinâmica e utiliza imagens de satélite TM-Landsat (composições coloridas, 5, vermelho; 4, verde; 3, azul), a fim de permitir uma visão holística da paisagem. A interpretação das imagens é realizada pelos padrões fotográficos identificados pelas variações de cores, textura, forma, padrões de drenagem e relevo.

Após a análise e interpretação das imagens TM-Landsat é possível obter a separação das unidades territoriais básicas do terreno. Em seguida, a este mapa de unidades territoriais são associados dados temáticos preexistentes (mapa geológico, geomorfológico, pedológico e de cobertura vegetal).

Através da integração dos dados são estabelecidas 21 classes de vulnerabilidade à erosão, que são distribuídas em situações com predomínio de processos de pedogênese (valores próximos a 1,0, mais estáveis), passando por situações intermediárias (valores

próximos a 2,0) e em situações com predomínio de processos de morfogênese (valores próximos a 3,0, mais vulneráveis).

Segundo Spörl e Ross (2004), o resultado final desta metodologia apresenta a vulnerabilidade de cada unidade ambiental em função das informações provenientes de cada tema avaliado: geologia, geomorfologia, vegetação, solos e clima.

Ou seja, cada unidade territorial básica recebe um valor final resultante da média aritmética dos valores individuais segundo uma equação empírica, que busca representar a posição desta unidade dentro da escala de vulnerabilidade natural à perda de solo, conforme mostrado na Equação 3.2.

$$Vulnerabilidade = \frac{G+R+S+V+C}{5} \quad (3.2)$$

Onde:

G = vulnerabilidade para o tema Geologia;

R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

S = vulnerabilidade para o tema Solos;

V = vulnerabilidade para o tema Vegetação;

C = vulnerabilidade para o tema Clima.

Dentro desta escala de vulnerabilidade as unidades territoriais básicas são classificadas conforme a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Classes de Vulnerabilidade (Spörl, Ross, 2004).

Classes de Vulnerabilidade	Intervalo de Classe
Muito Baixa	1,0 - 1,4
Baixa	1,4 - 1,8
Média	1,8 - 2,2
Forte	2,2 - 2,6
Muito Forte	2,6 - 3,0

A metodologia adotada por Rocha e Fernandes (2007) consta de duas frentes de trabalho: pré-geoprocessamento, com aquisição de dados em laboratório; e geoprocessamento dos dados, com obtenção de seus produtos e checagem em campo.

A primeira etapa, pré-geoprocessamento, consistiu na captura via scanner da base de dados pré-existent. A segunda fase da metodologia, consistiu no cruzamento e na avaliação destas bases de dados geocodificadas.

Inicialmente são produzidos os mapas de Litologia e de Intensidade de Lineamentos Estruturais, que ao serem cruzados geram o mapa de Fragilidade Geotécnica. Este deve ser cruzado com outro mapa produzido, o de Declividade. Originando, dessa forma, o mapa de Fragilidade Geológica, que por sua vez, cruzado com o mapa de Vegetação e Uso do Solo, gera o Mapa de Risco a Escorregamentos.

Nos cruzamentos, deve ser utilizado o sistema de pesos e notas para a aferição de maior ou menor vulnerabilidade a escorregamentos em cada plano de informação considerado, adotando-se as classes de baixíssimo, baixo, médio, alto e altíssimo risco a escorregamento de encostas.

Em relação às metodologias utilizadas para avaliar os níveis de fragilidade ambiental, todas apresentam certo grau de subjetividade passando desde matrizes de ponderação, por cruzamento de planos de informação até correlações matemáticas, buscando quantificar a fragilidade dos ambientes.

Algumas consideram apenas fatores naturais e outras também os antrópicos. Mas todas internacionais consideram que os fatores de influência devem ser selecionados para cada caso, em função das características do estudo e pela experiência dos profissionais envolvidos.

Utilizam interpretação de imagens de satélite, levantamento de dados secundários e até mesmo realização de ensaios, em função dos fatores de influência selecionados.

Há uma metodologia internacional recente que busca reduzir a subjetividade das ponderações utilizando o Processo de Análise Hierárquica (AHP) e lógica *fuzzy* para tratar o resultado.

Além disso, também utiliza o Sistema de Informação Geográfica (SIG) para realizar os cálculos e gerar a classificação final de fragilidade. O estudo foi aplicado para recuperação de áreas cársticas. Esta metodologia se mostra bastante interessante e com potencial para ser aplicado em problemas geotécnicos e ambientais.

3.3. Mapeamento Geotécnico

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), mapas e cartas são documentos cartográficos, que podem ser utilizados para várias finalidades como planejamento ambiental e urbano, gestão ambiental e de obras civis e avaliação de eventos perigosos. Tais documentos reúnem informações referentes a um ou mais aspectos do meio ambiente (físico, biótico e antrópico).

De acordo com a definição do IAEG (1976), o mapa geotécnico é um tipo de mapa geológico, que representa de forma generalizada todos os componentes do ambiente geológico, importantes ao planejamento e ao uso do solo, em projetos e em construção e manutenção de obras civis e de mineração (Rodrigues, 2008).

É importante ressaltar que existem diferentes definições no campo da cartografia geotécnica, com diferentes terminologias associadas a elas. Dessa forma, neste trabalho foi feita uma escolha em relação aos termos utilizados em cartografia de carta e mapa.

Os produtos cartográficos gerados neste trabalho receberam a denominação de Mapa. Os documentos de outros autores, citados no trabalho, receberam o nome original da publicação.

O mapeamento geotécnico é definido como o processo de avaliação das características do meio físico e seu comportamento quando submetido às diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos. Dessa forma, o mapeamento geotécnico inter-relaciona diversas áreas de conhecimento com as informações geotécnicas (Zuquette e Gandolfi, op. cit.).

Existem diferentes métodos propostos para a realização do mapeamento geotécnico. Para que o mesmo seja eficiente e, conseqüentemente representativo do meio ambiente, diversos fatores devem ser observados, como: atributos utilizados na elaboração, forma de obtenção das informações, escala espacial que se deseja trabalhar e a finalidade e usuário a que se destina o produto final.

Zuquette e Gandolfi (2004) propuseram um método para geração de cartas geotécnicas derivadas, no qual relacionam detalhadamente os atributos que interferem no comportamento de cada unidade perante o processo analisado.

Esses atributos são agrupados em relação aos componentes do meio ambiente: substrato rochoso, materiais inconsolidados, águas, relevo, feições do tecnógeno, evidências de processos, aspectos bióticos, aspectos antrópicos recentes e condições sócio-econômicas.

Ainda segundo os autores, os atributos considerados para elaboração de cada carta estão diretamente relacionados ao objetivo geral e podem variar em função da decisão do

profissional tratar parcialmente ou não o processo. A seguir, são apresentados os atributos relacionados pelos autores para a geração de alguns mapas de interesse na presente pesquisa.

a) Carta de potencial a erosão: escoamento superficial, infiltração, áreas de acúmulo de água, densidade de canais, tempo de concentração, profundidade/espessura do aquífero, gradiente hidráulico, amplitude do relevo, declividade, feições do terreno, formas e comprimento das encostas, tipo rochoso, litologia, espessura e distribuição do substrato rochoso, estruturas, existência de deposição ou erosão, origem, variação e distribuição dos materiais inconsolidados, textura, índice de vazios, mineralogia, pesos específicos, índice de erodibilidade, potencial a salinidade, expansibilidade, condutividade hidráulica, existência de depósitos de rejeitos, taxa de massa verde, profundidade de raízes, capacidade de retenção de água em superfície, pluviosidade, intensidade pluviométrica, distribuição temporal das chuvas, cordões de nível e existência de obras interferentes no fluxo de águas.

b) Carta de potencial a movimentos de massa gravitacionais: escoamento superficial, infiltração, áreas de acúmulo de água, densidade de canais, gradiente hidráulico, fontes naturais, escoamento básico, amplitude do relevo, declividade, direção e sentido da maior declividade, feições do terreno, formas e comprimento das encostas, litologia, distribuição do substrato rochoso, estruturas, grau de intemperismo, resistência mecânica, existência de subsidências, origem, variação e distribuição dos materiais inconsolidados, textura, mineralogia, expansibilidade, colapsividade, condutividade hidráulica, resistência mecânica, existência de área de aterro, profundidade de raízes, capacidade de retenção de água em superfície, pluviosidade, evapotranspiração, intensidade pluviométrica, cordões de nível, áreas de irrigação e existência de obras interferentes no fluxo de águas.

c) Carta de escoamento superficial e infiltração: áreas de acúmulo de água, bacias hidrográficas, densidade de canais, áreas de recarga, áreas com hidromorfismo, declividade, feições do terreno, formas e comprimento das encostas, litologia, mineralogia, profundidade e distribuição do substrato rochoso, origem, variação e distribuição dos materiais inconsolidados, textura, índice de vazios, condutividade hidráulica, taxa de massa verde, profundidade de raízes, capacidade de retenção de água em superfície, pluviosidade, insolação, intensidade pluviométrica,

distribuição temporal das chuvas, cordões de nível, canais de drenagem e áreas de irrigação.

d) Carta de potencial a corrosividade: infiltração, áreas de acúmulo de água, características físico-químicas, profundidade/espessura do aquífero, áreas com hidromorfismo, litologia, mineralogia, distribuição do substrato rochoso, estruturas, origem, variação e distribuição dos materiais inconsolidados, textura, delta pH, mineralogia, CTC, potencial a fertilidade, existência de aterros, evapotranspiração e intensidade pluviométrica.

3.4. Processos do Meio Físico

O meio ambiente é dinâmico e está sujeito a diversos processos, que podem ser físicos, ecológicos e até mesmo sociais.

Dentre estes processos podem ser citados processos geológicos de superfície (erosão, movimentos de massa, subsidências), processos geológicos de subsuperfície (corrosividade, colapsividade, expansividade), processos hidrológicos (assoreamento, escoamento superficial, inundações), processos atmosféricos (precipitação, difusão de poluentes), processos ecológicos (sucessão ecológica, ciclagem de nutrientes), além de vários outros (Sánchez, 2008).

Esses processos ocorrem simultaneamente em maior ou menor escala, dependendo da área de estudo. Por esse motivo, dependendo dos objetivos do estudo é possível focar apenas alguns desses processos, que sejam considerados de maior interesse.

Na presente pesquisa foram considerados mais relevantes para a área de estudo os processos de erosão pluvial, movimentos de massa, corrosividade, colapsividade, escoamento superficial e precipitação. Portanto, as características, os agentes e os condicionantes desses processos serão descritos de forma sucinta, a seguir.

3.4.1. Erosão Pluvial

Erosão é o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, vento gelo e organismos (IPT, 1986).

Segundo Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), em função do escoamento superficial, podem ser desenvolver dois tipos de erosão. Erosão laminar, causada pelo escoamento difuso da água e erosão linear, causada pela concentração das linhas de fluxo do

escoamento superficial, resultando em sulcos, que podem evoluir (aprofundamento) para ravinas. Se houver contribuição do escoamento subsuperficial, as ravinas podem evoluir para boçorocas.

Segundo Salomão e Iwasa (1995), a deflagração dos processos erosivos é comandada por diversos fatores relacionados às condições naturais dos terrenos, destacando-se chuva, cobertura vegetal, tipo de solo e topografia.

A água da chuva causa a erosão pelo impacto das gotas na superfície do solo exposto, caindo com velocidade e energia variáveis e pelo escoamento da enxurrada. Sua ação erosiva depende da distribuição e intensidade pluviométrica (Salomão e Iwasa, op. cit.).

A cobertura vegetal é a defesa natural do terreno contra erosão e tem como efeitos: proteção contra impacto direto das gotas de chuva; dispersão e quebra da energia das águas que escoam; aumento de infiltração por ação das raízes; e aumento da capacidade de retenção de água (Bertoni e Lombardi Neto, 1985).

As propriedades físicas do solo, principalmente textura, estrutura, permeabilidade, densidade, características químicas, biológicas e mineralógicas exercem diferentes influências para o processo erosivo, na medida em que confere maior ou menor resistência à ação das águas (Salomão e Iwasa, op. cit.).

A influência da topografia no processo erosivo é devida principalmente à declividade do terreno, por interferir na velocidade do escoamento. Klingebiel e Montgomery (1961) desenvolveram o método para elaboração de mapa de classes de capacidade de uso das terras (Lepsch, 1983), com finalidade de utilização no planejamento de práticas de conservação de solo, visando o controle da erosão.

Nesse método, são definidos intervalos de declividade associados ao potencial erosivo, mostrados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Classes de declividade para processo erosivo.

Classes de Declividade	Suscetibilidade à Erosão
< 3%	Não suscetível
3 - 6%	Baixa suscetibilidade
6 - 12%	Baixa a moderada suscetibilidade
12 - 20%	Moderada suscetibilidade

3.4.2. Movimentos de Massa

Os processos de transporte de matéria sólida da dinâmica superficial do planeta podem ser subdivididos em movimentos gravitacionais de massa, definidos como todos aqueles que são induzidos pela aceleração gravitacional. E movimentos de transporte de massa, onde o material movimentado é transportado por um meio qualquer como água, gelo ou ar (Hutchinson, 1968 *apud* Augusto Filho, 1995).

Os principais tipos de movimento de massa são rastejos, escorregamentos, quedas e corridas. A diferença entre eles é devida a velocidade e o tipo de material transportado em cada um.

Os condicionantes para este processo, em geral, são os mesmos que para erosão, porém com diferente divisão de classes. A declividade, por exemplo, influencia neste processo com valores mais elevados do que para erosão.

Augusto Filho (2001) realizou um estudo de risco ao escorregamento, no qual utilizou a técnica de retroanálise analisando os fatores condicionantes cartografados de forma isolada e sobreposta. Os fatores condicionantes considerados foram: declividade, unidades geotécnicas e uso e ocupação.

Dentre os resultados obtidos pelo autor, verificou-se concentração de escorregamentos a partir de declividades acima de 30%, atingindo máximo na faixa de 50 a 75%. Os escorregamentos na faixa de declividade inferior a 15% foram associados, principalmente, a locais de passagem de material instabilizado de trechos de encosta, com declividades mais acentuadas.

Em relação às classes de uso e ocupação, o autor verificou ampla concentração de área escorregada na classe de uso "vegetação arbustiva", seguida por "interferência antrópica". Relacionando as cicatrizes de escorregamento a uma condição de baixa a média interferência antrópica.

3.4.3. Corrosividade

A corrosividade do solo é definida como a capacidade do ambiente para desenvolver o processo de corrosão, as propriedades do solo exercem uma influência particular na corrosão eletroquímica modificando as condições dos processos anódicos e catódicos. A agressividade de um solo depende de características físicas (textura, estrutura, interação solo e água), propriedades químicas (acidez total, espécies iônicas) e biológicas (tipos de bactérias) (Loureiro et al., 2007).

No que se refere ao estudo de estruturas e equipamentos metálicos que serão enterrados no solo, como dutos e estacas metálicas, é fundamental conhecer a agressividade do solo e a interação solo-estrutura para poder prever o potencial corrosivo, que será apresentado.

O pH do solo é um bom indicador do processo corrosivo, uma vez que este corresponde a um dos produtos formados no ânodo, devido a capacidade de reação dos íons metálicos com o ânion OH^- . Quanto maior a concentração de H^+ , maior também será a quantidade de OH^- que poderá reagir com o íon do metal (Augusto Filho, 2008).

Alonso e Pannoni (2006) consideram que, em condições de pH acima de 6, o solo tende a possuir reduzido potencial de corrosividade, mesmo considerando condições de elevação do nível freático. Já com relação ao Eh e Potencial Redox, valores abaixo de 400 mV para solos arenosos, e 430 mV para solos argilosos, indicam condições de solo agressivo, com potencial de causar corrosão nas tubulações enterradas.

3.4.4. Colapsividade

Segundo Cintra e Aoki (2009), solos colapsíveis são solos não saturados, com baixo teor de umidade, e porosos, com alto índice de vazios, que podem sofrer uma espécie de colapso da sua estrutura em consequência à infiltração da água em quantidade suficiente. É o aumento do seu teor de umidade ou grau de saturação, mantida a tensão aplicada, que produz esse fenômeno nos solos colapsíveis.

O solo potencialmente colapsível apresenta um alto índice de vazios e um teor de umidade menor que o necessário para a saturação total do solo. Em geral, esses solos apresentam baixo grau de saturação e estrutura macroporosa e suas partículas maiores são mantidas por algum vínculo (cimentação ou tensão capilar), proporcionando resistência ao solo (Salomão e Iwasa, 1995).

3.4.5. Escoamento Superficial

O escoamento superficial é a fase do ciclo hidrológico que trata do conjunto das águas que, por efeito da gravidade, se desloca na superfície da Terra. Parte do volume de água precipitado é interceptada pela vegetação e outras barreiras e retorna à atmosfera por evaporação (Garcez, 1967)..

Do restante que atinge a superfície do solo; parte retorna por evaporação no solo e superfícies líquidas, parte pela transpiração de vegetais; e outra parte é absorvida por infiltração, o restante escoar livremente pela superfície do terreno, seguindo linhas de maior declive (Garcez, 1967).

É importante conhecer seu comportamento, pois influencia no dimensionamento de obras hidráulicas, além de influenciar no processo erosivo e de inundação de várzeas, por exemplo. O escoamento superficial é influenciado por fatores como características dos solos e rochas, declividade, existência de vegetação, forma da bacia de drenagem, entre outros (Jorge e Uehara, 1998).

Em relação à declividade, uma classificação adotada em estudos de escoamento superficial é a proposta pela EMBRAPA (1979), mostrada na Tabela 3.9.

Quanto aos índices de forma da bacia de drenagem, merece destaque o Índice de Circularidade (IC), que estabelece a relação entre a área da bacia e seu perímetro, conforme a Equação 3.3. Quanto mais próximo a 1 for IC, mais circular será a bacia (Grochocki, 2008).

$$IC = 12,57 \cdot \frac{A}{P^2} \quad (3.3)$$

Onde,

IC: índice de circularidade;

A: área da bacia;

P: perímetro da bacia.

Segundo Porto (1992), diversos métodos podem ser aplicados para a determinação da parcela de precipitação total que se transforma em escoamento superficial. Deve-se ressaltar que os processos hidrológicos de infiltração e outras perdas são extremamente complexos e, portanto, nenhum dos métodos correntes em engenharia apresenta soluções inteiramente satisfatórias.

Tabela 3.9 – Classes de declividade.

Classes de Declividade	Descrição
< 3%	Relevo plano
3 - 8%	Relevo suave ondulado
8 - 20%	Relevo ondulado
20 - 45%	Relevo forte ondulado
45 - 75%	Relevo montanhoso
> 75%	Relevo forte montanhoso

Dentre os métodos, merecem destaque a Fórmula de Horton, o Método do Índice ϕ e o Método do Soil Conservation Service – SCS. O último, por ser um modelo extremamente difundido e de interesse neste trabalho, será detalhado (Porto, 1992).

No método do SCS, é proposto um índice denominado CN (número da curva), necessário para o cálculo do escoamento superficial. Esse índice depende de três fatores: umidade antecedente do solo, tipo de solo e ocupação do solo (Porto, op. cit.).

Em relação à umidade antecedente do solo, são distinguidas três condições: Condição I – solos secos (chuvas até 25mm); Condição II – situação frequente em épocas chuvosas (chuvas entre 25 e 50mm); e Condição III- solo úmido (chuvas superiores a 50mm).

Em relação aos solos, são distinguidos cinco grupos hidrológicos de solo, que foram adaptados ao Estado de São Paulo, conforme mostrado a seguir (Porto, op. cit.):

- Grupo A: Solos arenosos com baixo teor de argila total (inferior a 8%); não há rocha, nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas, até profundidade de 1m; o teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
- Grupo B: Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, este limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir respectivamente a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1m, mas é quase sempre presente camada mais densificada do que a camada superficial.
- Grupo C: Solos barrentos com teor total de argilas de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas estes dois limites máximos podem ser 40% e 1m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
- Grupo D: Solos argilosos (30 – 40% de argila total) e ainda com camada densificada a cerca de 50cm de profundidade, ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.
- Grupo E: Solos barrentos como C, mas com camada argilosa impermeável, ou com pedras, ou sem tal camada, mas com teor de argila superior a 40%. No caso de terras roxas esse teor pode subir a 60% (no caso D, 45%).

Em relação à ocupação do solo, esta é classificada de acordo com a existência de cobertura vegetal ou não e pelo tipo de defesa contra erosão, eventualmente adotado. Existe uma tabela que relaciona o tipo de ocupação de solo, com o grupo hidrológico e o índice CN.

3.4.6. Chuvas Intensas

Entende-se por precipitação a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre sob qualquer forma: chuva, granizo, neblina, etc. Representa a ligação entre os demais fenômenos hidrológicos e o escoamento superficial (Carvalho e Silva, 2006).

A precipitação é medida pela altura de água caída e acumulada sobre a superfície plana e impermeável. Deve ser avaliada pela medição em pontos previamente selecionados (e bem distribuídos), através da utilização de aparelhos chamados pluviômetros e pluviógrafos.

A altura média de precipitação em uma área específica é necessária em muitos tipos de problemas hidrológicos, como na determinação do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, que pode ser feita com um estudo temporal isolado ou baseado em totais anuais.

Existem vários métodos para realizar esta tarefa, mas o mais simples e direto é o Método Aritmético. Esse método apresenta boa estimativa (em relevos suaves) e consiste em determinar a média aritmética entre as quantidades medidas na área (Carvalho e Silva, op. cit.).

3.5. Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão

A todo momento é necessário que se tome uma decisão, nas diversas atividades desempenhadas pelo ser humano. Nesses momentos, diferentes escolhas podem ser feitas, conduzindo a diferentes resultados para um mesmo problema. Por esse motivo, é necessário que se decida pela melhor opção para atender aos objetivos do problema.

Segundo Gonçalves (2001), mesmo sendo parte integrante do cotidiano das pessoas, a tomada de decisão é uma atividade intrinsecamente complexa e potencialmente das mais controversas. É necessário que se escolha não somente uma entre possíveis alternativas de ação, mas também entre pontos de vista e formas de avaliar essas ações. Ou

seja, é necessário considerar uma multiplicidade de fatores direta e indiretamente relacionados com a decisão a ser tomada.

A decisão, portanto, é uma atividade que engloba múltiplas dimensões, perspectivas e objetivos. Para ser possível tomar uma decisão é preciso ponderar todos esses fatores em questão, mesmo que sem um método sistemático estabelecido.

A consideração dos diversos fatores dificulta a tomada de decisão, avaliando-se apenas um único critério. Por isso, é importante a utilização de metodologias para a tomada de decisão, que levem em conta todos os aspectos que são considerados como relevantes para um dado problema (Gonçalves, 2001).

Os Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) surgiram na área de Pesquisa Operacional e se constituem em um conjunto de técnicas para auxiliar ou apoiar a tomada de decisões, analisando diversos critérios simultaneamente. Para ser possível aplicar qualquer método multicritério, é necessário que os objetivos pretendidos estejam bem delimitados, permitindo comparar entre diferentes alternativas para solução do problema (Bana e Costa, 2002).

Todas as abordagens de Análise Multicritério (AM) fazem opções e contribuições para diferentes critérios, e todas requerem o exercício de julgamento. Diferem, entretanto, no modo em que combinam os dados.

Técnicas formais de AM normalmente fornecem um sistema explícito de ponderação relativa aos diferentes critérios. A principal função das técnicas é enfrentar as dificuldades, que os tomadores de decisão têm mostrado ao lidar com grandes quantidades de informações complexas de forma consistente (Dodgson et al., 2009).

Segundo Dodgson et al. (op. cit.), as técnicas de AM podem ser utilizadas para identificar uma melhor opção, hierarquizar opções, listar um número limitado de opções para uma subsequente avaliação mais detalhada, ou simplesmente fazer distinção entre possibilidades aceitáveis e inaceitáveis.

A análise multicritérios apresenta diversas vantagens em relação à análise com julgamento informal, dentre elas podem ser citadas:

- É aberta e explícita;
- A escolha dos objetivos e critérios que qualquer grupo de decisores pode fazer é aberta à análise e a mudanças, se for necessário;

- Notas e pesos, quando usados, também são explícitos e desenvolvidos de acordo com técnicas estabelecidas. Também podem ser cruzadas com outras fontes de informação de valores relativos e alteradas, se necessário;
- A avaliação dos critérios pode ser realizada por especialistas, portanto não precisa necessariamente ser feita pelos tomadores de decisão;
- Pode fornecer um importante meio de comunicação, dentro do corpo tomador de decisão;
- As notas e pesos utilizados podem ser auditados.

Utilizando uma técnica de multicritério de apoio à decisão é possível elaborar uma formulação matemática representativa do problema analisado, subsidiando o cálculo e a ponderação dos critérios analisados pelo usuário. Para a realização de tais cálculos, podem ser utilizadas diferentes formas, dentre elas a soma ponderada, o produto ponderado e a soma ponderada modificada.

Segundo Soares (2006), a soma ponderada consiste em atribuir pesos para cada critério e, em seguida, para cada ação realizar um somatório do produto do peso pela avaliação do critério. O somatório obtido é então dividido pela soma dos pesos atribuídos, conforme pode ser visto na Equação 3.4.

$$S^j = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^j \cdot p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3.4)$$

Onde,

S^j : Soma ponderada da ação j ;

E_i^j : Avaliação (valor) do critério i para a ação j ;

p_i : Coeficiente de ponderação.

A soma ponderada é uma regra de agregação frequentemente utilizada, porém apresenta algumas deficiências como a sensibilidade à escala e a compensação de critérios. A primeira pode ser resolvida com utilização da soma ponderada modificada e a segunda com a utilização do produto ponderado.

De acordo com Salomon et al. (1999) existem diversos métodos que fornecem valores de desempenho global das alternativas, já utilizados com sucesso em diversas situações, dentre eles:

- AHP: proposto por Saaty (1977);
- Método de Análise em Redes (ANP – *Analytic Network Process*): também desenvolvido por Saaty (1996);
- Abordagem de Decisão Fuzzy (FDA – *Fuzzy Decision Approach*): baseada em conjuntos *Fuzzy* e proposta por Liang e Wang (1992);
- MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*): proposto por Bana e Costa e Vasnick (1994);
- TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*): cujo desenvolvimento se deve a Hwang e Yoon (1981).

Dentre os critérios utilizados para a seleção de um dos diversos métodos, estão (Dodgson et al., 1999):

- Consistência interna e solidez lógica;
- Transparência;
- Facilidade de uso;
- Dados requeridos não inconsistentes com a importância da questão analisada;
- Viabilidade de auditoria do método;
- Disponibilidade do software, quando for o caso.

Em função da variedade dos métodos existentes e das diferentes características de cada um é importante selecionar o que melhor se adeque à pesquisa. O método utilizado na presente pesquisa é o AHP, pois permite sistematizar e manter as análises consistentes.

Segundo Barbarosoglu e Pinhas (1995) *apud* Faria (2011), o método AHP pode ser aplicado em diversos tipos de problemas como econômico, político, social e ambiental, em função de sua simplicidade, de sua base matemática e capacidade de avaliar fatores qualitativos e quantitativos.

3.6. Método de Processo de Análise Hierárquica (AHP)

O Processo de Análise Hierárquica (AHP) foi desenvolvido por Saaty (1980) e comumente é referido como o Método Saaty. É um método popular e amplamente utilizado, especialmente em análises militares. Porém, não é restrito para resolução de problemas

militares. Na verdade, em seu trabalho, Saaty descreve casos de aplicação que variam desde a escolha de uma escola para seu filho até o planejamento do sistema de transporte no Sudão (Coyle, 2004).

Segundo Saaty (2008), o processo de análise hierárquica baseia-se na decisão de forma organizada para gerar prioridades, sendo necessário decompor a decisão nos seguintes passos:

1. Definir o problema e determinar o tipo de conhecimento buscado;
2. Estruturar a decisão hierárquica do topo com o objetivo da decisão, então os objetivos de uma perspectiva ampla, através de níveis intermediários até os níveis inferiores;
3. Construir um conjunto de matrizes pareadas. Cada elemento de nível superior é usado para comparar os elementos de nível imediatamente inferior;
4. Usar as prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades no nível imediatamente inferior. Então, para cada elemento do nível inferior adicionar seu peso e obter sua prioridade global.

Teknomo (2006) explica didaticamente o Processo Analítico Hierárquico. Iniciando pela comparação pareada, o autor utiliza a comparação entre três frutas: banana, maçã e cereja. No exemplo, primeiramente compara-se a preferência entre duas opções (banana e maçã), na Figura 3.4 é mostrada tal comparação.

Nesta comparação verifica-se forte preferência pela banana em relação à maçã. No caso de haver três opções, o mesmo procedimento deve ser feito, como mostrado na Figura 3.5.

Neste caso, seriam realizadas três comparações. O número de comparações possíveis depende do número de objetos em análise, obedecendo à Equação 3.5.

$$C = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3.5)$$

Onde,

C: número de combinações;

n: número de objetos.

Em seguida, deve ser elaborada uma matriz recíproca a partir das comparações pareadas. Seguindo com o exemplo exibido na Figura 3.5, será elaborada uma matriz 3x3, porque são feitas três comparações.

As diagonais serão sempre 1 e o resto da matriz deverá ser preenchido respeitando a seguinte regra: se o valor de julgamento estiver à esquerda do valor 1 da escala, insere-se o próprio número; se o valor de julgamento estiver à direita do valor 1 da escala, insere-se o inverso do número (Teknomo, 2006). A matriz que ilustra o exemplo é mostrada na Tabela 3.10.

Figura 3.4 – Comparação de preferência entre duas opções.

Figura 3.5 – Comparação de preferência com três opções.

Tabela 3.10 – Matriz recíproca de comparação pareada.

	Maçã	Banana	Cereja
Maçã	1	1/3	5
Banana	3	1	7
Cereja	1/5	1/7	1

A Equação 3.6 mostra como a matriz de decisão deve ser elaborada.

$$A_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Segundo Saaty (1999) *apud* Faria (2011), a matriz de comparação deve atender as seguintes propriedades:

- Identidade: todos os elementos da diagonal devem ser iguais a 1, ou seja, para todo i , é necessário que $a_{ii}=1$. Portanto, a diagonal representa cada elemento comparado a si mesmo, com mesma importância;
- Reciprocidade: cada elemento acima da diagonal é igual ao inverso do elemento correspondente, situado abaixo da diagonal, ou seja, $a_{ij}=1/a_{ji}$;
- Consistência ou coerência: a matriz paritária deve satisfazer a propriedade de transitividade. Significando que no caso de uma comparação de 3 critérios, se A é preferível a B e B é preferível a C, consequentemente A deve ser preferível a C.

A próxima etapa consiste no cálculo do vetor de prioridade, normalizado pelo auto vetor da matriz elaborada. O procedimento é realizado em três etapas, mostradas a seguir:

- 1) Cada coluna deve ser somada, como mostrado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Soma das colunas da matriz recíproca.

Crítérios	Maçã	Banana	Cereja
Maçã	1	1/3	5
Banana	3	1	7
Cereja	1/5	1/7	1
Soma	21/5	31/21	13

- 2) Então a normalização é realizada, dividindo cada elemento da matriz pela soma de sua coluna, resultado na soma unitária, como mostrado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Normalização da matriz recíproca.

Crítérios	Maçã	Banana	Cereja
Maçã	5/21	7/31	5/13
Banana	15/21	21/31	7/13
Cereja	1/21	3/31	1/13
Soma	1	1	1

3) Finalmente, o autovetor ou vetor de prioridades é obtido pelo cálculo da média aritmética de cada linha da matriz, como mostrado na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Cálculo do Auto vetor da Matriz recíproca.

Crítérios	Maçã	Banana	Cereja	Autovetor
Maçã	5/21	7/31	5/13	0,2828
Banana	15/21	21/31	7/13	0,6434
Cereja	1/21	3/31	1/13	0,0738
Soma	1	1	1	1

O vetor de prioridades mostra pesos relativos entre os objetos comparados. Neste exemplo, maçã é 28,28%, banana 64,34% e cereja 7,38%, ou seja, a fruta preferida é a banana, seguida pela maçã e cereja.

O próximo passo é verificar a consistência da atribuição dos pesos (Teknomo, 2006). Isto é feito através do cálculo do autovalor, que é obtido somando-se os produtos de cada elemento do autovetor pela soma das colunas da matriz. No exemplo, o autovalor é obtido pela Equação 3.7.

$$\lambda_{max} = \frac{21}{5}(0,2828) + \frac{31}{21}(0,6434) + 13(0,0738) = 3,0967 \quad (3.7)$$

Em seguida, calcula-se o valor do Índice de Consistência (I_C), que representa quanto o autovalor está afastado do valor teórico esperado n . Esse índice é obtido pela Equação 3.8.

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (3.8)$$

Conhecendo o I_c , é necessário que este seja comparado com um índice apropriado. Saaty propôs a comparação com o Índice de Consistência Randômico (ICR). O ICR representa o valor que seria obtido em uma matriz paritária de ordem n , que fosse preenchida com valores sem julgamento, de forma aleatória.

Saaty calculou o ICR para uma amostra de 500 matrizes, até a ordem 11x11. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 3.14.

Então, é possível calcular a Razão de Consistência, que é a divisão entre o I_c e o ICR, conforme a Equação 3.9.

$$RC = I_c / ICR \quad (3.9)$$

Se o valor de RC for menor ou igual a 10%, a inconsistência é aceitável. Se for maior, é necessário revisar os julgamentos subjetivos realizados. No exemplo das frutas, $I_c=0,0484$ e o ICR para $n=3$ é 0,58. Resultando em $RC=0,083$, ou 8,3%. Ou seja, a avaliação subjetiva realizada foi consistente.

Tabela 3.14 – Índice de Consistência Randômico calculado para 500 matrizes (Teknomo, 2006).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ICR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

3.7. Sistema de Informação Geográfica – SIG

Segundo Câmara e Davis (2001), a coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel; isto impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados.

Com o desenvolvimento simultâneo, na segunda metade deste século, da tecnologia de Informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento.

Nesse contexto, o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional.

As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos (Câmara, Davis, 2001).

Segundo Rufino et al. (2006), numa visão abrangente, pode-se indicar que um SIG tem os seguintes componentes: interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de consulta e análise espacial; visualização e plotagem; e armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos), ilustrado na Figura 3.6.

Um sistema de Informação Geográfica (SIG) difere dos demais sistemas, pela sua capacidade de estabelecer relações espaciais entre elementos gráficos. É o sistema mais adequado para análise espacial de dados geográficos.

Essa capacidade é conhecida como topologia, ou seja, o estudo genérico dos lugares geométricos, com suas propriedades e relações. Esta estrutura, além de descrever a localização e a geometria das entidades de um mapa, define relações de conectividade, contiguidade e pertinência.

Figura 3.6 – Estrutura geral de Sistemas de Informação Geográfica (Câmara, Davis, 2001).

Além dos dados geométricos e espaciais, os Sistemas de Informação Geográfica possuem atributos alfanuméricos. Os atributos alfanuméricos são associados com os elementos gráficos, fornecendo informações descritivas sobre eles. Os dados alfanuméricos e os dados gráficos são armazenados, geralmente, em bases separadas.

Os programas para SIG são projetados de modo a permitir exames de rotina em ambas as bases gráficas e alfanuméricas, simultaneamente. O usuário é capaz de procurar informações e associá-las às entidades gráficas e vice-versa.

Os dados utilizados em SIG podem ser divididos em dois grandes grupos: dados gráficos, espaciais ou geográficos, que descrevem as características geográficas da superfície (forma e posição). E os dados não gráficos, alfanuméricos ou descritivos, que descrevem os atributos destas características.

Os dados espaciais podem ser representados basicamente de duas formas distintas em um SIG: vetorial (vetor) e matricial (raster). Já os dados alfanuméricos ainda podem ser subdivididos em dois tipos: atributos dos dados espaciais; e atributos georreferenciados.

3.8. SIG como Ferramenta de Modelagem Ambiental

Cada vez mais, os computadores vêm sendo utilizados como ferramentas de apoio a procedimentos de estudos, de análises e de simulações em vários campos do conhecimento humano. Sistemas complexos para análises e para modelagens foram desenvolvidos para se trabalhar dados relacionados com áreas específicas como finanças, transportes, geologia, solos, etc (Felgueiras, 1999).

Nessa mesma tendência, sistemas de armazenamento, manipulação e apresentação de dados espaciais, conhecidos como SIG, foram criados e estão sendo utilizados no campo das ciências ambientais. Modelos matemáticos, aritméticos e lógicos, buscando representar propriedades e processos do meio físico natural, têm sido implementados, nos SIG, com o objetivo de facilitar o seu estudo e compreensão para que se possa atuar sobre o meio ambiente de forma responsável e cooperativa.

Para que isto ocorra, é imperativo que se considere o tratamento das incertezas das representações dos dados espaciais envolvidos em um modelo matemático ambiental apoiado em SIG. As incertezas destas representações, uma vez propagadas para os resultados finais das modelagens, qualificam os produtos gerados em SIG para o apoio efetivo aos processos de tomadas de decisão baseados nesses produtos (Felgueiras, op. cit.).

A potencialidade principal de um SIG está na sua capacidade de realizar análises complexas a partir da integração, em uma base de dados única, de representações de dados espaciais. Os procedimentos de análise espacial, desenvolvidos no ambiente de um SIG, possibilitam, no estágio tecnológico atual, a análise de processos, alguns simples e outros mais complexos, do mundo real. Para isto é necessário a criação de modelos ambientais, que representem adequadamente o fenômeno natural em estudo.

Assim, a modelagem ambiental, neste contexto, consiste na criação de modelos matemáticos, determinísticos ou estocásticos, que relacionam atributos ambientais na tentativa de representar o comportamento de um processo ocorrendo na natureza. Os modelos ambientais são, então, transformados em modelos computacionais para serem executados no ambiente de um SIG (Felgueiras, 1999)

Como ferramenta de modelagem o SIG pode ser utilizado como pré-processador de informações, empregando-se uma interface para conversão e transferência dos dados armazenados em SIG para os arquivos de entrada dos modelos desenvolvidos em outros programas computacionais (Tsou, Whittemore, 2001 *apud* Almeida, 2006).

Após a execução do modelo, a interface é utilizada novamente para que os arquivos de saída do modelo sejam transferidos para o SIG novamente, onde os resultados obtidos pela simulação são apresentados. Nessa forma de integração, o SIG assume o papel de pós-processador (Tsou, Whittemore, 2001 *apud* Almeida, 2006).

4. MÉTODO

A pesquisa foi desenvolvida utilizando uma abordagem híbrida dos métodos científicos indutivo, dedutivo e experimental, frequentemente utilizados nas pesquisas geológico-geotécnicas e ambientais. O método adotado na presente pesquisa consiste basicamente nas seguintes etapas:

a) Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos da pesquisa, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foram estabelecidas as principais atividades a serem executadas;

b) Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo, em particular o conceito e a elaboração de mapas de fragilidade ambiental, a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação do método;

c) Proposição de um método: baseado nos métodos levantados na etapa de revisão bibliográfica foi proposto um método de elaboração de mapas de fragilidade ambiental, utilizando pesos através da técnica de AHP e um programa de SIG como ferramenta para as análises;

d) Aplicação do método: o método proposto foi aplicado na área de estudo, setor do oleoduto OSBRA. A aplicação do método envolveu a utilização de uma base cartográfica digital, além da elaboração de mapas temáticos e de suscetibilidade. Foram também realizadas vistorias de campo e ensaios de laboratório para auxiliar a elaboração dos mapas;

e) Análise dos resultados: após aplicação do método, os resultados obtidos foram avaliados em função do que se esperava;

f) Conclusões: com os resultados avaliados foram elaboradas as conclusões, evidenciando a relevância de estudos de fragilidade ambiental, bem como mostrando a sensibilidade do método adotado.

As principais etapas do método de geração do mapa de fragilidade ambiental são apresentadas na Figura 4.1 e serão descritas detalhadamente nos subitens a seguir.

Figura 4.1 – Etapas do método de geração do mapa de fragilidade ambiental.

4.1. Revisão Bibliográfica – Conceito de Fragilidade Ambiental

A primeira etapa necessária para viabilizar o desenvolvimento e aplicação do método utilizado nesta pesquisa foi o levantamento bibliográfico sistemático a cerca do conceito de fragilidade ambiental. Tal etapa foi necessária, pois este é um termo que foi recentemente retomado em estudos geotécnicos e ambientais, porém é constantemente utilizado de formas diferentes.

Esta etapa consistiu em retomar a definição do conceito em suas primeiras aplicações, buscando encontrar seu sentido original. Observou-se também em que tipo de estudos o conceito era aplicado e quais fatores eram levados em consideração para as análises.

4.2. Método de Análise da Fragilidade Ambiental

O método para análise da fragilidade ambiental foi desenvolvido pautado pelo conceito adotado como mais adequado. Portanto, analisou-se a fragilidade ambiental considerando apenas fatores intrínsecos ao meio ambiente, e buscando, na medida do possível, englobar aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Foi utilizada uma abordagem dedutiva, partindo do mais geral para o mais específico. Portanto, para gerar o mapa de fragilidade ambiental foram necessários mapas de suscetibilidade intermediários, que avaliam a suscetibilidade da área para os diferentes

processos físicos que possam ocorrer, além dos potenciais danos aos elementos bióticos e socioeconômicos existentes.

A princípio foram elencados todos os processos possíveis de ocorrer no meio ambiente, porém alguns deles foram descartados por não ocorrerem na área de estudo, perdendo o sentido de analisá-los. Um exemplo é o processo de sismos, que não se aplica na área.

Logo, os mapas utilizados para a área de estudo foram os seguintes: suscetibilidade à erosão, suscetibilidade à movimentos de massa, suscetibilidade à corrosão, suscetibilidade ao escoamento superficial, suscetibilidade a chuvas intensas, suscetibilidade ao colapso e suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

Após terem sido definidos os mapas intermediários a serem utilizados para a área de estudo, foram definidos os atributos que deveriam ser analisados. Esses atributos foram definidos adaptando-se o método proposto por Zuquette (1987; 2004).

Esses atributos são planos de informações básicos (mapas temáticos), sendo que alguns deles já haviam sido previamente elaborados por Augusto Filho (2008) como é o caso da carta de declividade, do mapa de curvatura, do mapa de materiais inconsolidados e de parte do mapa de uso e ocupação.

Outros foram gerados nesta pesquisa, como o de chuvas intensas médias, de nível freático (indireto), de bacias hidrográficas e a atualização do mapa de uso e ocupação. Na Tabela 4.1 são apresentados os atributos utilizados para elaborar cada mapa de suscetibilidade intermediário.

Em relação aos atributos do mapa de suscetibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos, estes foram definidos a partir do mapa de uso e ocupação, considerando as diferentes ocupações humanas, atividades econômicas desenvolvidas e a presença de áreas naturais existentes ou legalmente protegidas.

Finalmente, foram definidas as classes dos atributos previamente definidos. Alguns atributos já tinham suas classes previamente definidas (limitadas pela ocorrência na área) como é o caso da curvatura, materiais inconsolidados, uso, além de alguns valores numéricos como o índice de circularidade da bacia, por exemplo.

As classes de declividade para erosão foram definidas baseadas no método de capacidade de uso do solo e as para movimentos de massa nas classes discutidas por Augusto Filho (2001). As classes de declividade para escoamento superficial foram adaptadas do proposto pela Embrapa (1979), ainda para o escoamento superficial as classes de tipo de solo foram agrupadas e classificadas de acordo o método proposto pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA).

Tabela 4.1 – Atributos utilizados para elaboração dos mapas de suscetibilidade intermediários (Adaptado de Zuquette, 1987; 2004).

Mapa de suscetibilidade intermediário	Atributos
Erosão	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade • Curvatura • Materiais inconsolidados • Uso e ocupação
Movimentos de massa	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade • Curvatura • Materiais inconsolidados • Uso e ocupação
Corrosão	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais inconsolidados • Nível freático (indireto)
Colapso	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais inconsolidados • Nível freático (indireto)
Escoamento superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Declividade • Materiais inconsolidados • Uso e ocupação • Índice de circularidade da bacia
Chuvas Intensas	<ul style="list-style-type: none"> • Chuvas intensas médias
Fatores bióticos e socioeconômicos	<ul style="list-style-type: none"> • Uso e ocupação

As faixas de variação de nível d'água foram agrupadas em quatro, imaginando-se níveis raso, médio, profundo e muito profundo. Os valores de eventos climáticos intensos foram extraídos do banco de dados digital disponível no Sistema de Informações para o Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo – SigRH (2012).

Para facilitar a visualização foram elaborados fluxogramas para cada mapa a ser gerado com seus diferentes atributos e respectivas classes, que serão apresentados nos resultados.

Uma vez definidos os atributos e classes de atributos a serem analisados foi necessário atribuir pesos a cada um deles. O método selecionado para realizar tal tarefa foi o Método de Processo de Análise Hierárquica (AHP), pois ao utilizá-lo se garante consistência em todas as ponderações realizadas.

Portanto, foram elaboradas matrizes para cada mapa a ser gerado correlacionando de forma pareada os atributos e as classes de atributo, de forma a permitir a análise da importância relativa de cada um dos fatores e obter os pesos finais. Um exemplo dessa matriz é mostrado na Tabela 4.2, na qual são apresentadas as comparações paritárias realizadas para os atributos do mapa de suscetibilidade à erosão.

Os julgamentos realizados (matrizes AHP) pelo autor deste trabalho, para obtenção dos pesos de cada mapa de suscetibilidade intermediários, bem como os resultados obtidos serão apresentados no item “Análise dos Resultados”.

Os pesos finais utilizados resultaram da multiplicação do peso da classe pelo seu respectivo atributo. Estes pesos finais foram então atribuídos a cada classe de atributo, no software ArcGIS 9.3, em uma tabela de atributos para ser possível realizar operações matemáticas para sobreposição dos mapas de interesse para cada mapa intermediário. O método matemático utilizado para realizar a sobreposição foi o de soma ponderada, discutido por Soares (2006).

As operações de soma ponderada foram realizadas com a ferramenta *Single Output Map Algebra* (disponível no software ArcGIS 9.3) para geração de cada mapa intermediário. As notas finais obtidas foram agrupadas em 5 classes (Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta) e foi utilizado o método de classificação *Natural Breaks*, que identifica automaticamente quebras naturais na população de dados analisando o histograma.

Com os mapas intermediários gerados, foi possível obter o mapa de fragilidade ambiental pela sobreposição dos mesmos com uma operação de soma simples, também com a ferramenta *Single Output Map Algebra*.

Foi utilizada a operação de soma simples para atribuir a cada mapa intermediário a mesma importância (peso) para geração do mapa final. Adicionalmente, poderiam ser realizadas diferentes combinações de mapas intermediários para verificar-se a sensibilidade da área de estudo aos diferentes fatores de análise.

Tabela 4.2 – Exemplo de matriz AHP utilizada.

MATRIZ RECÍPROCA

Atributos	Declividade	Curvatura	Uso	Tipo de Solo
Declividade	1/1	7/1	3/1	2/1
Curvatura	1/7	1/1	1/3	1/4
Uso	1/3	3/1	1/1	1/2
Tipo de Solo	1/4	4/1	2/1	1/1
SOMA	1,73	15,00	6,33	3,75

4.3. Base Cartográfica

Todos os planos de informação desta pesquisa foram gerados a partir de uma base cartográfica digital com dados na escala 1:10.000. Ela foi elaborada a partir de folhas topográficas na escala 1:10.000 do Instituto Geográfico do Estado de São Paulo (IGC). Também foram utilizadas fotografias aéreas digitais na escala 1:5.000.

Foi adotado o sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator – UTM, de coordenadas plano-retangulares métricas, *datum* Córrego Alegre, fuso 23º. Esse sistema foi escolhido por ser o mesmo das folhas topográficas originais.

As folhas topográficas foram digitalizadas em *scanner*, com resolução 300 *dpi* no formato *bmp*, georreferenciadas em coordenadas geográficas no ArcMap 9.1 e convertida para coordenadas UTM. Foram vetorizados curvas de nível, pontos cotados, drenagens, espelhos d'água, rodovias principais e linhas de transmissão (alta tensão).

Quanto às fotos aéreas digitais, foram utilizadas vinte fotos aéreas coloridas, obtidas em voos realizados entre 2000 e 2003, de propriedade da empresa BASE (Aerofotogrametria e Projetos S/A). As fotos foram adquiridas no formato digital, com 900 *dpi* de resolução a partir dos filmes fotográficos no formato *tif*.

4.4. Mapas Temáticos

Os mapas temáticos representam a espacialização dos atributos do meio físico, biótico e socioeconômico. Esses atributos combinados traduzem os diferentes processos do meio físico, além dos potenciais danos ambientais.

Alguns desses mapas temáticos já haviam sido previamente gerados e foram disponibilizados no formato digital, outros foram gerados nesta pesquisa. Neste item será descrito brevemente o método de geração dos mesmos. É importante ressaltar que todos foram gerados utilizando o software ArcGIS 9.3®.

4.4.1. Modelo Digital de Terreno (MDT), Mapas de Declividade e Curvatura

O MDT no formato *grid* foi gerado a partir da ferramenta *Topo to raster* do módulo *Spatial Analyst* do programa ArcGIS. Os dados de entrada foram curvas de nível, pontos cotados e linhas de drenagem (todos digitalizados a partir da base cartográfica). O tamanho da malha (*grid*) utilizada na interpolação foi de 4m.

A partir do MDT foram gerados os mapas de declividade e curvatura do terreno. O mapa de declividade foi elaborado utilizando a ferramenta *Slope* disponível no módulo *3D Analyst* do programa ArcGIS. Já o mapa de curvatura foi gerado com a ferramenta *Curvature* do mesmo módulo.

4.4.2. Mapa de Materiais Inconsolidados

O mapa de materiais inconsolidados foi gerado a partir do mapa geológico da área, apresentado por Ferreira (1999), na escala 1:50.000, com ajustamento dos contatos subsidiado por levantamentos de campo.

De acordo com a classificação de perfis de alteração proposta por Vaz (1996), foram identificados horizontes de solo transportado, solo residual maduro e jovem, além de rocha em diferentes graus de alteração e fraturamento. As unidades identificadas foram então digitalizadas no ambiente SIG.

4.4.3. Mapa de Uso e Ocupação

Havia um mapa de uso e ocupação pré-existente (Augusto Filho, 2008) que foi complementado e atualizado nesta pesquisa. Procurou-se manter as classes de uso previamente levantadas.

Para identificar essas classes, foram feitas as vistorias de campo, nas quais se verificaram os usos atuais. Além disso, também foram utilizadas fotos aéreas digitais coloridas de 2003, atualizando-as com as imagens de satélite obtidas no programa Google Earth™, que correspondem a imagens Cnes/Spot dos anos de 2010 e 2011.

Os polígonos das classes identificadas foram vetorizados no programa ArcMap 9.3, e finalmente, agruparam-se os polígonos de mesma classe utilizando a ferramenta *Dissolve*.

4.4.4. Mapa de Nível Freático

O mapa de nível freático foi elaborado considerando as distâncias das drenagens perenes, que refletem a profundidade do nível d'água subterrâneo. Quanto mais próximo da drenagem, menor será a profundidade.

Para realizar a correlação entre as distâncias das drenagens e profundidade do nível de água foram utilizados dados de sondagens a trado (que atingiram o nível freático) e sondagens elétricas verticais, que existiam na área. Essa estimativa foi realizada, pois havia poucos dados diretos de nível d'água subterrânea.

Logo, para produzir o mapa procedeu-se com a geração de um arquivo matricial (raster) contendo as distâncias em relação às drenagens. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Euclidean Distance*.

4.4.5. Mapa de Chuvas Intensas Médias

O mapa de chuvas intensas médias foi elaborado a partir de dados de séries históricas registrados por 41 pluviômetros instalados em cidades localizadas no entorno da área de estudo, são elas: Ribeirão Preto, Cravinhos, São Simão, Sertãozinho, Barrinha, Pradópolis, Guataporá, Luis Antônio, Serra Azul e Serrana.

Foram utilizados apenas os dados dos meses mais chuvosos para a área, ou seja, de Dezembro a Março. Os dados foram obtidos no site do Sistema de Informações para o Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo – SigRH (2012).

Esses dados foram inseridos em uma planilha Excel e exportados para o ArcMap, gerando um arquivo de pontos contendo os valores médios de precipitação dos meses chuvosos. Então, interpolou-se uma superfície de valores de chuva média para toda a área, para isso utilizou-se a ferramenta *Topo to Raster*. Os valores obtidos foram classificados com o método de *Natural Breaks*.

4.4.6. Mapa de Bacias Hidrográficas

Para gerar esse mapa foi utilizada a ferramenta *Basin*, que retorna bacias ou sub-bacias em função do número de classes selecionado. Para utilizar essa ferramenta foi necessário um raster contendo a direção do fluxo superficial, gerado com a ferramenta *Flow Direction*, utilizando como entrada o Modelo Digital do Terreno.

Após gerar o mapa, ainda foi necessário tratar o resultado final agrupando manualmente algumas sub-bacias menores, que eram pouco representativas isoladamente, na escala de trabalho.

4.5. Mapas de Suscetibilidade Intermediários

4.5.1. Mapa de Suscetibilidade à Erosão e a Movimentos de Massa

Para elaboração desses mapas foram utilizados os mesmos mapas de entrada, são eles: declividade, curvatura, materiais inconsolidados e uso e ocupação. A única diferença é

na divisão das classes do mapa de declividade usada para gerar cada mapa. Essa divisão é apresentada em detalhe nos respectivos itens de resultado.

As classes dos mapas citados acima receberam os pesos obtidos na ponderação AHP, em suas tabelas de atributos. Em seguida, foram sobrepostos em uma operação de soma simples. Par realizar tal sobreposição foi utilizada a ferramenta *Single Output Map Algebra* do módulo *Spatial Analyst*.

4.5.2. Mapa de Suscetibilidade ao Escoamento Superficial

O mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial foi elaborado a partir dos mapas de declividade, de bacias hidrográficas, de materiais inconsolidados e de uso e ocupação. A divisão das classes desses mapas é apresentada no item de resultados.

Foi aplicado o método de ponderação AHP para cada classe e os pesos obtidos foram inseridos na tabela de atributos. A partir dos pesos foi possível realizar a sobreposição dos planos de informação (soma simples), utilizando a ferramenta *Single Output Map Algebra*.

4.5.3. Mapa de Suscetibilidade à Corrosão e ao Colapso

Esses dois mapas também tiveram os mesmos dados de entrada, que foram o nível de água freático (indireto) e o mapa de materiais inconsolidados. Contudo, a divisão de classes deles foi diferente para cada mapa de suscetibilidade, como pode ser visto no item de resultado.

Os pesos obtidos nas matrizes AHP foram atribuídos em uma tabela de atributos. Finalmente, os mapas foram sobrepostos pela realização de soma simples utilizando a ferramenta *Single Output Map Algebra*.

4.5.4. Mapa de Suscetibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos

O único atributo (mapa temático) utilizado para geração deste mapa de suscetibilidade foi o de uso e ocupação. Dessa forma, as classes desse mapa foram agrupadas e reclassificadas de acordo com os pesos obtidos na ponderação AHP.

4.5.5. Mapa de Suscetibilidade a Chuvas Intensas

Da mesma forma que para o mapa anterior, a geração deste envolveu apenas a utilização de um mapa temático, neste caso o de chuvas intensas médias. Os pesos obtidos

na ponderação AHP foram atribuídos às classes do mapa, gerando o mapa de suscetibilidade a chuvas intensas.

4.6. Vistorias de Campo

Já haviam sido feitas visitas de campo previamente a esta pesquisa, nas quais foram levantados pontos de observação de superfície e realizadas sondagens a trado e sondagens elétricas verticais. Dessa forma, as visitas realizadas neste trabalho tiveram como objetivo complementar e atualizar o banco de dados existente.

Foram realizadas, portanto, duas vistorias de campo. Na primeira foram levantados mais pontos de observação de superfície, a fim de aumentar a densidade de pontos de controle para a área. Além disso, foi possível verificar possíveis mudanças no uso e ocupação desde o último levantamento e também definir os pontos nos quais deveriam ser coletadas amostras para os ensaios de laboratório.

Na segunda vistoria de campo, foi feita a coleta de amostras deformadas e indeformadas nos locais previamente selecionados. Foram realizadas coletas em todas as unidades de materiais inconsolidados, com exceção dos depósitos aluvionares, pela dificuldade de acesso. Em ambas as vistorias foram feitos registros de pontos de interesse através de fotos digitais.

4.7. Ensaios de Laboratório

Durante a etapa de levantamento de dados, nas visitas de campo, foram coletadas amostras de solo (deformadas e indeformadas) para serem analisadas em laboratório. O objetivo dessa caracterização foi auxiliar nas análises realizadas para gerar a ponderação dos diferentes atributos relativos aos mapas de suscetibilidade intermediários.

Foram realizados os ensaios geotécnicos de granulometria conjunta, massa específica dos sólidos e determinação do índice de vazios; ensaios químicos de pH e Eh; e ensaios mineralógicos de Azul de Metileno, Difração de Raios-X e Análise Térmica Diferencial (ATD) e Gravimétrica (ATG).

4.7.1. Ensaios geotécnicos

Os ensaios de granulometria conjunta e massa específica dos sólidos foram realizados conforme as normas ABNT NBR-7181/84 e ABNT NBR-6508/84, respectivamente (ABNT, 1984a; ABNT, 1984b). O índice de vazios foi obtido a partir de correlações dos índices físicos, determinados em amostra indeformada, conforme descrito por Nogueira (2005).

4.7.2. Ensaios químicos

Os ensaios de pH e Eh foram realizados de acordo com o método descrito em Embrapa (2011), com os principais passos descritos a seguir.

- Colocar 10ml de solo em recipiente de 100ml;
- Adicionar 25ml de água; agitar a amostra e deixar em repouso por uma hora;
- Agitar a amostra com bastão de vidro, mergulhar os eletrodos na suspensão homogeneizada e proceder a leitura.

4.7.3. Ensaios mineralógicos

Para realização do ensaio de Azul de Metileno foi utilizado o método de Papel Filtro, proposto por Lan (1977) e adaptado por Pejon (1992) para solos tropicais. Este ensaio tem como objetivo a determinação da capacidade de troca catiônica, da superfície específica e da atividade dos argilominerais.

As modificações propostas neste ensaio são referentes à granulometria da amostra e à concentração da solução de azul de metileno a ser usada. Em relação à granulometria, originalmente foi proposto que se utilizassem partículas de dimensão inferior a 0,5mm e a adaptação indica o uso de amostras que passam pela peneira de 2,00mm.

Quanto à concentração da solução de azul de metileno, na adaptação utiliza-se 1,5g/l ao invés de 10g/l, pois solos tropicais apresentam argilominerais com baixa capacidade de adsorção, pela sua formação, e, dessa forma, resultados mais precisos são obtidos. Para sua realização foi seguido o procedimento, descrito a seguir.

Pesou-se massa de, aproximadamente, 0,5g da amostra de argila, que foi colocada em um bquer de 100ml e a ela adicionaram-se 10ml de água destilada. O bquer contendo a solução foi deixado sobre o agitador magnético por, aproximadamente, três minutos.

Adicionou-se 1ml de solução de Azul de Metileno na concentração de 1,5g/l e manteve-se a solução argila + água + azul de metileno em agitação constante durante 30s. Em seguida, retirou-se uma gota da suspensão com um bastão de vidro que foi colocada sobre papel de filtro Watmann's 42.

Se houvesse a formação de uma auréola de coloração azul clara ao redor da gota (indicando a presença de azul de metileno livre), como pode ser visto na Figura 4.2, o teste poderia ser considerado positivo. Neste caso, a suspensão deveria continuar em agitação por mais três minutos e mais uma gota colocada sobre o papel, se novamente o resultado fosse positivo o ensaio estaria encerrado.

Se não houvesse a formação da auréola de coloração azul clara ao redor da gota, como pode ser visto na Figura 4.2, o teste deveria ser considerado negativo. E o procedimento de adição de 1ml de azul de metileno, aguardando 30s e repetindo o teste no papel filtro deveria ser repetido até que o teste resultasse positivo.

Ao final do ensaio alguns parâmetros de interesse foram calculados, a fim de ser possível proceder a identificação dos argilominerais. Esses cálculos foram feitos de acordo com as Equações de 4.1 a 4.5.

Figura 4.2 – Possíveis resultados para o teste de azul de metileno (adaptado de Musso, 2008 *apud* Rodríguez, 2013).

$$CTC = \frac{V.C.100}{M} \quad (4.1)$$

Onde,

CTC: capacidade de troca catiônica (meq/100g);

V: volume de azul de metileno gasto (ml);

C: concentração da solução (N);

M: massa de amostra seca (g).

$$SE_A = \frac{A.N.m}{M_{am}.1000} \quad (4.2)$$

Onde,

SEA: superfície específica recoberta por 1ml da solução de azul de metileno (m²);

A: área da face da molécula de azul de metileno (m²);

N: número de Avogadro;

m: massa de azul de metileno seco (g);

M_{am}: massa molecular do azul na forma anidra.

$$SE = \frac{SE_A.V}{M} \quad (4.3)$$

Onde,

SE: superfície específica do material (m²/g);

SE_A: superfície específica recoberta por 1ml da solução de azul de metileno (m²);

V: volume gasto da solução de azul (ml);

M: massa do solo seco (g).

$$V_b = \frac{C.V.100}{M.1000} \quad (4.4)$$

Onde,

V_b: valor de azul de metileno (g/100g);

C: concentração da solução (g/ml);

V: volume gasto da solução de azul (ml);

M: massa do solo seco (g).

$$A_{cb} = \frac{V_b}{\% \text{ Arg}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Onde,

A_{cb} : atividade da fração argila (g/100g);

V_b : valor de azul de metileno (g/100g);

% Arg: porcentagem de argila na amostra.

O ensaio de Difração de Raios-X foi realizado através da preparação de três lâminas com argilas orientadas, que em seguida foram encaminhadas para o laboratório do Instituto de Física de São Carlos (IFSC) para serem analisadas. O procedimento para preparação das lâminas é descrito a seguir.

A amostra de solo foi passada pela peneira #400 e uma massa de, aproximadamente, 0,5g obtida. Em seguida, a amostra foi dispersa em 500ml de água destilada e adicionaram-se 100ml de solução de hexametáfosfato de sódio. Esta solução foi agitada em agitador mecânico durante cinco minutos. E a solução deixada em repouso por doze horas e então novamente agitada por quinze minutos.

O conteúdo foi repartido entre três recipientes com porta amostra no fundo. Após os três minutos, colocou-se uma lâmina de vidro em cada recipiente e aguardaram-se 24h para que a suspensão pudesse sedimentar sobre a lâmina. Após este período de 24h o excesso de água foi retirado, permitindo que as lâminas secassem ao ar em temperatura ambiente.

Uma das lâminas foi somente seca ao ar; outra após estar seca foi aquecida em mufla a 550° durante uma hora; e a terceira foi colocada em um dessecador contendo solução de etileno-glicol. As lâminas assim tratadas foram encaminhadas ao laboratório do IFSC e os resultados recebidos foram tratados no programa Origin®.

Para identificar o argilomineral foi necessário o cálculo do valor da distância basal, que é feito pela Equação 4.6.

$$\text{\AA} = \frac{1,5418}{2 \cdot \sin\left(\frac{2\theta}{2} \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \quad (4.6)$$

Onde,

$\text{\AA}$: distância basal;

2θ : ângulo de difração.

O ensaio de Análise Térmica Diferencial (ATD) consiste no aquecimento da amostra a temperatura uniforme e velocidade constante. A variação de temperatura da amostra é então comparada com a de um material inerte. Para a realização deste ensaio foi realizado o procedimento descrito a seguir.

A primeira etapa consistiu na programação do software instalado no computador, que controla os fornos do ensaio. Já foram programados, nesta etapa, ambos os ensaios de ATD e ATG sequenciais. Foi programada uma velocidade de aquecimento de 12,5º/min até um máximo de 1000ºC.

Em seguida, as câmaras do bloco de análise foram preenchidas, duas com o padrão considerado inerte (aluminossilicato) e uma com a amostra, atentando-se para que a amostra ficasse no sensor que provocava uma diferença positiva de temperatura.

As câmaras foram preenchidas totalmente, com o auxílio de uma espátula, de forma a ficarem bem compactadas. Ao final do preenchimento, o excesso de amostra foi removido da superfície do bloco de análise com um pincel. Colocou-se a tampa no porta-amostra, e o forno foi posicionado e tampado e, finalmente, iniciou-se o programa, que controlava o ensaio.

O ensaio de Análise Térmica Gravimétrica (ATG) permite registrar a variação da massa da amostra de argila em função da variação de temperatura, submetida a uma programação controlada.

Uma balança, ligada ao computador que controla os fornos do ensaio, foi ligada previamente para estabilizar sua medição. Em seguida, a mesma foi zerada com o cadinho vazio e foi pesada uma massa de, aproximadamente, 5,0g da amostra no cadinho. O forno foi posicionado e tampado. O programa, que estava previamente ajustado para aquecer a uma velocidade de 12,5º/min até uma temperatura de 1000ºC, foi iniciado.

Os dados dos ensaios de ATD e ATG foram registrados e armazenados pelo próprio software que conduz os ensaios. Ao término dos ensaios sequenciais, foi possível exportá-los no formato reconhecido pelo programa Excel, para poder gerar gráficos com os quais se procedeu a identificação dos argilominerais presentes.

4.8. Materiais

Para a realização desta pesquisa e aplicação do método foram utilizados alguns materiais e também softwares, descritos a seguir:

- Folhas topográficas na escala 1:10.000 do Instituto Geográfico do Estado de São Paulo (IGC);

- Fotos aéreas digitais coloridas, obtidas em voos realizados em 2003, de propriedade da empresa BASE (Aerofotogrametria e Projetos S/A);
- Imagens de satélite Cnes/Spot de 2010 e 2011, disponíveis no programa Google Earth™;
- Base cartográfica e documentação, previamente elaboradas por Augusto Filho (2008);
- Mapas temáticos básicos, previamente elaborados por Augusto Filho (2008): modelo digital do terreno (MDT), carta de declividade, mapa de curvatura, mapa de materiais inconsolidados e mapa de uso e ocupação (parcial);
- Mapas temáticos básicos, elaborados na pesquisa: chuvas intensas médias, nível freático (indireto), bacias hidrográficas e uso e ocupação (complementação);
- Programas: ArcGIS 9.3[®], Origin[®] e Microsoft Excel.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa, referentes ao conceito de fragilidade ambiental bem como ao método para avaliação de seus diferentes níveis.

Além disso, também são apresentados os resultados referentes aos mapas temáticos utilizados, vistorias de campo e ensaios de laboratório realizados. Apresentam-se também as classes de atributos e as matrizes de ponderação AHP utilizadas na geração dos mapas de suscetibilidade intermediários.

Finalmente, é apresentado o mapa de fragilidade ambiental gerado para a área de estudo. Esse resultado é discutido quanto sua adequação à definição adotada, além da discussão quanto o potencial de aplicação para gestão do oleoduto.

5.1. Conceito de Fragilidade Ambiental

Tendo em vista tudo o que foi discutido, a presente pesquisa adota como definição que a fragilidade ambiental representa a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente. E que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente, considerando inclusive os usos e ocupações humanas consolidados no momento do estudo, como internos ao sistema.

Esses fatores internos são representados pelos diferentes processos do meio físico, que ocorrem na área de estudo, além dos potenciais danos aos elementos bióticos e socioeconômicos existentes.

Dessa forma, toda mudança de uso como a implantação de um novo empreendimento, por exemplo, representa os fatores externos. Quando esses fatores afetarem o meio ambiente, diferentes respostas poderão resultar, em função da fragilidade ambiental desse sistema. Essa resposta representa a alteração ou impacto ambiental. Esta definição é similar à utilizada em estudos de vulnerabilidade de aquíferos.

Portanto, quando se analisarem as características internas do meio ambiente, estará se avaliando a fragilidade ambiental. E quando se relacionar este resultado com informações da pressão antrópica, estarão se considerando as possíveis alterações ou impactos ambientais que poderão ocorrer.

Além disso, acredita-se ser importante buscar reduzir a subjetividade no processo de análise dos fatores. Por isso, o método de Processo Analítico Hierárquico (AHP) para realizar as ponderações se mostra interessante. E para agilizar e sistematizar as análises, além de

melhorar a qualidade dos resultados o uso de um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) é recomendável.

5.2. Base Cartográfica

A base cartográfica engloba área de estudo, que se situa na região do oleoduto OSBRA entre a estaca 157,8, no município de São Simão e a estaca 176,3, próximo ao limite urbano do município de Cravinhos, com cerca de 18,5km de extensão. Trabalhou-se com uma área de 2km de cada lado do oleoduto, totalizando 83,99km².

Essa base cartográfica é apresentada na escala 1:25.000, no APÊNDICE A, no qual também são mostrados os elementos de documentação, que serão mais bem explicados no item "Vistorias de Campo".

A base cartográfica utilizada nesta pesquisa havia sido elaborada previamente por Augusto Filho (2008). O autor obteve erro médio de georreferenciamento inferior a 1m. As fotos aéreas ajustadas à base resultaram em erro final de, aproximadamente, 10m.

A base cartográfica original é maior do que a área de estudo desta pesquisa, abrange a porção noroeste do município de São Simão, atravessa a área central do município de Cravinhos, e acaba no terminal da Transpetro, localizado na porção oeste do município de Ribeirão Preto. Portanto, ela foi recortada nos limites da área de estudo, aproximadamente, 40% do total.

5.3. Mapas Temáticos

Como citado no método, foram necessários alguns mapas temáticos para possibilitar a espacialização dos atributos utilizados nos mapas de suscetibilidade intermediários e de fragilidade ambiental. Neste item são apresentados e discutidos os principais resultados desses mapas, que foram utilizados ou gerados.

5.3.1. Modelo Digital do Terreno (MDT), Mapas de Declividade e Curvatura

O Modelo Digital do Terreno (MDT) é um modelo matemático da superfície, gerado com base nas coordenadas espaciais e nas cotas altimétricas. Ele é um plano de informação fundamental para a maioria das análises espaciais, pois a partir dele se derivam outros mapas básicos (declividade, curvatura, direção de fluxo superficial, etc.). O MDT utilizado havia sido gerado previamente por Augusto Filho (2008).

Foram gerados dois MDT's, um no formato *grid*, representado por uma matriz de "n" linhas por "m" colunas, e um no formato *TIN* (*Triangular Irregular Network*), representado por uma rede de triângulos. Os dois modelos foram gerados a fim de permitir a verificação de qual seria mais adequado para a área.

Ambos os modelos foram gerados adotando um tamanho de malha (*grid*) de 4m, considerando um valor 20% inferior ao erro cartográfico admissível (0,5mm na escala do mapa impresso 1:10.000).

Foi feita uma validação visual dos modelos, com a interpolação de curvas de nível a partir do MDT com metade do intervalo das curvas originais. Dessa forma, foi possível realizar a comparação visual entre os modelos e as curvas digitalizadas. Verificou-se que as curvas interpoladas a partir do modelo no formato *grid* apresentaram traçados mais coincidentes com os das curvas originais.

Além disso, para verificar a precisão e acuidade dos MDT's foi realizado procedimento para calcular o *Root Mean Square Error* (RMS) ou erro médio quadrático. Obteve-se um RMS menor para o formato *grid*, 0,06m contra 0,08m do formato *TIN*. Ainda foram elaborados histogramas de frequência dos RMS pontuais de cada modelo, resultando que o MDT *grid* apresenta 81,8% dos seus RMS pontuais inferiores a 0,12m, enquanto no MDT *TIN* o valor foi de 77,3%.

Pelos motivos discutidos acima, o MDT no formato *grid* foi considerado mais adequado e, portanto, este foi utilizado neste trabalho. Em especial dois mapas derivados do MDT foram de interesse para a pesquisa: o de declividades e o de curvatura do terreno. Por isso, os mesmos serão discutidos a seguir.

O mapa de declividades é de grande importância para analisar processos de dinâmica superficial. Na Figura 5.1 é apresentado um recorte representativo do mesmo.

A Tabela 5.1 sintetiza a distribuição em área das classes de declividade. Percebe-se que a classe predominante é de 6 a 12% (38,4% da área total), e que as classes que englobam as declividades de 0 a 12% representam 87,4% do total. Apenas 1,1% da área apresenta declividades superiores a 30%. Dessa forma, verifica-se que para a área de estudo a predominância é de relevo suave.

Figura 5.1 – Mapa de declividades.

Tabela 5.1 – Distribuição de classes de declividade.

Classes de Declividade	Área (m²)	% da Área Total
0 - 3	13690560	16,3
3 - 6	27475744	32,7
6 - 12	32231824	38,4
12 - 20	7898176	9,4
20 - 30	1760224	2,1
30 - 50	875904	1,0
> 50	58752	0,1

Em relação ao mapa de curvatura do terreno, este permite identificar áreas coletoras de água superficial (superfícies côncavas), áreas dispersoras (superfícies convexas) e áreas de fluxo difuso (superfícies planas). Consequentemente, essas formas influenciam na dinâmica dos processos superficiais.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as porcentagens por área das três classes de curvatura e na Figura 5.2 é apresentado um recorte representativo do Mapa de Curvatura. Pode-se observar que as superfícies côncavas (coletoras) coincidem com os fundos de vale e que as convexas (dispersoras) com os divisores. Observa-se que as superfícies convexas são predominantes na área, com 40,3%, e as côncavas se estendem por 37,3% da área.

Tabela 5.2 – Distribuição de classes de curvatura do terreno.

Classe de Curvatura	Área (m²)	% da Área Total
Côncava	31326768	37,3
Plana	18846416	22,4
Convexa	33818000	40,3

Figura 5.2 – Mapa de curvatura.

5.3.2. Mapa de Materiais Inconsolidados

O mapa de materiais inconsolidados também é um plano de informação de grande importância, pois foi considerado na geração de quase todos os mapas intermediários. Esse mapa também foi gerado previamente por Augusto Filho (2008).

As unidades de materiais inconsolidados e seus perfis de alteração típicos foram identificados de acordo com a classificação de perfis de alteração de Vaz (1996).

Sob o ponto de vista genético, os materiais inconsolidados podem ser unidades de solo transportado, representadas pelos depósitos aluvionares e coberturas arenosas dendríticas de topo de morro. E unidades de solos residuais dos basaltos (jovem e maduro) da Formação Serra Geral, do Arenito Intertrapiano e do Arenito Botucatu.

Na Tabela 5.3, é mostrada a distribuição em área das unidades dos materiais inconsolidados citados acima. Na Figura 5.3, é mostrado um recorte representativo da área, contendo as unidades mapeadas.

Tabela 5.3 – Distribuição percentual de classes de materiais inconsolidados.

Classe de Material Inconsolidado	Área (m²)	% da Área Total
Coberturas Arenosas	2191568	2,6
Depósitos Aluviais	484496	0,6
S. R. Arenito Botucatu	26285840	31,3
S. R. Arenito Intertrapiano	210240	0,2
S. R. Basalto Jovem	1238368	1,5
S. R. Basalto Maduro	53532512	63,8

Figura 5.3 – Mapa de materiais inconsolidados.

Augusto Filho (2008) subdividiu os solos residuais dos basaltos da formação Serra Geral em dois grupos, denominados jovem e maduro, em função do grau de desenvolvimento pedológico do perfil de alteração.

Os solos do grupo maduro apresentam horizontes de solo eluvial espesso (em geral, superior a 5m), com estrutura homogênea, textura argilosa com areia ou silte, consistência baixa a média, plasticidade marcante e cor vermelho-escuro. Os horizontes de solo residual jovem com estruturas residuais e os níveis de rocha alterada mole só ocorrem em profundidades de 8 a 10m. Esta é a unidade predominante na área de estudo, ocupando 63,8% da área.

Os solos do grupo jovem caracterizam-se por um perfil de alteração menos desenvolvido, apresentando solo de alteração, níveis de rocha alterada mole e rocha alterada dura em profundidades inferiores a 5m. Estão associados à presença de dique e sills de diabásio, ou terrenos de declividade mais acentuada (superior a 30%), com substrato de basalto.

Os solos residuais dos arenitos Intertrapiano e os da formação Botucatu apresentam perfil de alteração caracterizado pela textura arenosa com finos (argila e silte), estrutura homogênea, consistência fofa a média, pouco coesivo e sem apresentar estruturas residuais. Apresenta cor típica variando de cinza a vermelho claro. Essas duas unidades juntas ocupam 31,5% da área, com predominância do arenito da formação Botucatu (31,3%).

Os solos transportados de cobertura arenosa apresentam textura areno-argilosa, estrutura heterogênea, marcada pela presença de macroporos e aglomerados de grãos de quartzo, finos e hidróxidos e óxidos de ferro. Sua cor típica é marrom-avermelhado. Apresentam elevada coesão aparente, podendo ser suscetível ao processo de colapsividade. Distribui-se por 2,6% da área.

A ocorrência dos solos de depósito aluvionar está associada às drenagens principais da área, sendo caracterizados por sedimentos desagregados areno-silto-argilosos, com cascalho e horizontes orgânicos. Apresentam cor típica cinza-variegado. Ocupa apenas 0,6% da área total.

Foram também realizados ensaios de granulometria e massa específica dos sólidos, além de análises químicas (pH e Eh) e ensaios mineralógicos, que permitiram caracterizar as unidades mapeadas.

5.3.3. Mapa de Uso e Ocupação

O mapa de uso e ocupação pré-existente, elaborado por Augusto Filho (2008), foi complementado e atualizado. O autor havia definido treze classes de uso: mata, reflorestamento, campo sujo, cultura perene, pastagem, cultura anual, cana, solo exposto, faixa de linhas de transmissão (LT), faixa de vias, áreas industriais, propriedades rurais e loteamento.

A complementação do mapa de uso e ocupação visou manter, na medida do possível, as classes previamente definidas. Deste modo, foi apenas adicionada uma classe denominada área urbana e a classe de cultura anual foi agrupada com a classe cana. Na Tabela 5.4, é apresentada a distribuição percentual por área das diferentes classes de uso e ocupação e na Figura 5.4 é apresentado um recorte representativo do mapa.

Verificou-se predominância do uso de plantações de cana-de-açúcar na área de estudo, como pode ser observado no recorte do mapa e também pela tabela, na qual é indicado valor de 72,4% para essa classe. Excetuando a cana-de-açúcar, os usos mais encontrados são campo sujo, mata, pastagem e área urbana, cada um com distribuição entre 4 e 5% de área.

Tabela 5.4 – Distribuição em área das classes de uso e ocupação.

Classe de Uso e Ocupação	Área (m²)	% da Área Total
Campo sujo	4153984	4,9
Cana	60730672	72,4
Cultura Perene	2704688	3,2
Faixa Vias	2312272	2,8
Faixa LT	314128	0,4
Inst. Indústrias	65376	0,1
Loteamento	42992	0,1
Mata	4059824	4,8
Pastagem	3949648	4,7
Prop. Rurais	627200	0,7
Reflorestamento	1153648	1,4
Solo Exposto	163424	0,2
Área Urbana	3612048	4,3

Figura 5.4 – Mapa de uso e ocupação.

5.3.4. Mapa de Nível Freático

O mapa de nível freático foi obtido de forma indireta, conforme descrito no método de geração deste plano de informação. Dessa forma, o que se apresenta é um mapa com as distâncias relativas aos cursos d'água perene.

Os dados disponíveis indicaram que em distâncias inferiores a 20m das drenagens perenes, o nível d'água subterrânea (N. A.) tende a ocupar profundidades inferiores a 1,5m, ou seja, coincidentes com o nível médio de assentamento do oleoduto. Em distâncias até 100m, o N. A. ainda pode apresentar profundidades inferiores a 5m, e eventualmente, atingir profundidades de assentamento do oleoduto.

Entre 100 e 500m de distância das drenagens perenes, o N. A. tende a apresentar profundidades entre 5 e 25m e, dificilmente atingirá o nível de assentamento do oleoduto. E acima de 500m de distância, o N. A. apresenta profundidades superiores a 25m.

Dessa forma, baseando-se nessa correlação, as classes do mapa de distância das drenagens foram divididas. Na Tabela 5.5 é sumarizada a distribuição de áreas de cada classe e na Figura 5.5 é mostrado um recorte do mapa ilustrando essa divisão. Como a área não apresenta uma concentração de drenagens muito elevada, há um amplo predomínio da classe com distância superior a 500m, com 68,7%.

Portanto, os níveis freáticos na área são relativamente profundos. Contudo, é importante ressaltar a aproximação do resultado, uma vez que este tipo de análise não permite considerar a existência de aquíferos suspensos, por exemplo. Logo, a ponderação que foi realizada utilizando esse mapa foi apenas estimada e pode não representar a situação real de campo.

Tabela 5.5 – Distribuição de área das classes de distâncias.

Classes de distâncias (m)	Área (m2)	% da Área Total
< 20	1061520	1,3
20 - 100	4028928	4,8
100 - 500	21113664	25,2
> 500	57685808	68,7

Figura 5.5 – Mapa de distâncias relativas às drenagens.

5.3.5. Mapa de Chuvas Intensas Médias

O mapa de chuvas intensas médias foi utilizado apenas na geração do mapa de suscetibilidade a chuvas intensas. Ele representa uma superfície com valores das médias de precipitação dos meses mais chuvosos na área de estudo, registrados por pluviômetros.

A distribuição desses pluviômetros na área de estudo é apresentada na Figura 5.6. Além disso, os dados dos pluviômetros utilizados para geração deste mapa são apresentados na Tabela 5.6. Observa-se que os pluviômetros utilizados encontram-se distribuídos ao redor de toda a área de estudo.

Figura 5.6 – Distribuição dos pluviômetros na área de estudo.

Tabela 5.6 – Dados de chuva acumulada registrados em pluviômetros.

Município	Prefixo	Latitude	Longitude	Série Histórica (anos)	Chuva Dezembro (mm)	Chuva Janeiro (mm)	Chuva Fevereiro (mm)	Chuva Março (mm)	Chuva Média (mm)
Ribeirão Preto	C4-002	21°08'	47°54'	17	260	240	206	125	207,75
Ribeirão Preto	C4-025	21°12'	47°52'	69	262	289	227	178	239,00
Ribeirão Preto	C4-034	21°13'	47°52'	65	255	267	217	150	222,25
Ribeirão Preto	C4-055	21°08'	47°48'	28	233	233	194	174	208,50
Ribeirão Preto	C4-057	21°18'	47°56'	61	238	241	189	144	203,00
Ribeirão Preto	C4-058	21°18'	47°57'	28	213	262	203	162	210,00
Ribeirão Preto	C4-059	21°18'	47°52'	28	258	270	224	173	231,25
Ribeirão Preto	C4-060	21°08'	47°43'	26	209	219	199	160	196,75
Ribeirão Preto	C4-061	21°10'	47°47'	9	262	268	235	263	257,00
Ribeirão Preto	C4-062	21°09'	47°47'	27	254	291	205	159	227,25
Ribeirão Preto	C4-064	21°12'	47°52'	27	260	297	230	168	238,75
Ribeirão Preto	C4-075	21°06'	47°45'	60	250	260	218	174	225,50
Ribeirão Preto	C4-081	21°09'	47°48'	7	304	281	203	145	233,25
Ribeirão Preto	C4-081A	21°12'	47°52'	7	276	318	195	201	247,50
Cravinhos	C4-007	21°22'	47°43'	68	250	260	195	160	216,25
Cravinhos	C4-015	21°23'	47°42'	28	260	265	223	176	231,00
Cravinhos	C4-032	21°20'	47°47'	50	257	262	210	162	222,75
Cravinhos	C4-042	21°22'	47°43'	28	240	252	207	152	212,75
São Simão	C4-014	21°24'	47°38'	35	268	195	190	110	190,75
São Simão	C4-016	21°33'	47°28'	20	154	113	94	79	110,00
São Simão	C4-017	21°29'	47°33'	23	181	223	160	147	177,75
São Simão	C4-047	21°23'	47°25'	31	268	281	257	167	243,25
São Simão	C4-050	21°25'	47°25'	30	230	257	221	151	214,75
São Simão	C4-052	21°22'	47°26'	58	265	260	210	170	226,25
São Simão	C4-066	21°28'	47°36'	29	233	280	252	170	233,75
São Simão	C4-087	21°26'	47°35'	56	261	270	219	171	230,25
São Simão	C4-091	21°30'	47°36'	35	268	273	222	160	230,75
Sertãozinho	C4-090	21°08'	47°59'	8	294	225	259	149	231,75
Sertãozinho	C4-104	21°05'	47°54'	28	294	286	248	200	257,00
Sertãozinho	C5-103	21°11'	48°07'	6	251	174	165	122	178,00
Sertãozinho	C5-114	21°06'	48°04'	50	250	257	221	149	219,25
Barrinha	C5-115	21°11'	48°07'	50	278	289	235	178	245,00
Pradópolis	C5-104	21°22'	48°04'	36	254	235	211	154	213,50
Guataparã	C5-020	21°30'	48°02'	69	209	209	183	144	186,25
Luis Antônio	C4-010	21°33'	47°42'	19	230	200	206	146	195,50
Luis Antônio	C4-011	21°29'	47°45'	19	180	180	165	116	160,25
Luis Antônio	C4-012	21°28'	47°50'	18	191	180	155	99	156,25
Luis Antônio	C4-056	21°27'	47°54'	54	245	265	215	150	218,75
Luis Antônio	C4-096	21°35'	47°42'	36	260	250	216	162	222,00
Serra Azul	C4-818AN	21°19'	47°29'	1	-	315	259	145	239,67
Serrana	C4-083	21°13'	47°36'	55	246	246	210	166	217,00

Para ilustrar os resultados, é apresentada a Tabela 5.7, com a distribuição em área das classes, bem como a Figura 5.8, com um recorte do mapa gerado.

Os valores foram classificados (com o método *Natural Breaks*) variando de muito baixo a muito alto, que representam as classes: <201,5mm; de 201,5 a 210,1mm; de 210,1 a 216,4mm; de 216,4 a 222,4mm; e >222,4mm. Verifica-se que há uma distribuição relativamente equitativa de precipitação, com suave predominância da classe média (de 210,1 a 216,4mm), com 33,61%.

As diferentes classes apresentam grandes extensões, ficando com a representação limitada na área do recorte apresentado na Figura 5.7. Porém, é possível visualizar no mesmo a separação entre duas classes, relativas às zonas com precipitação média de 210,1 a 216,4mm e 216,4 e 222,4mm.

Tabela 5.7 – Distribuição em área das classes de chuvas médias.

Classes de Chuvas Médias	Área (m²)	% da Área Total
< 201,5mm	7837808	9,33
201,5 – 210,1mm	14624816	17,42
210,1 – 216,4mm	28224368	33,61
216,4 – 222,4mm	20129280	23,97
> 222,4mm	13160608	15,67

Figura 5.7 – Mapa de chuvas intensas médias.

5.3.6. Mapa de Bacias Hidrográficas

O mapa de bacias hidrográficas gerado apresentou, no total, quinze bacias hidrográficas, sendo que algumas não apresentam nenhum curso d'água perene. Tal fato se justifica, pois a área de estudo situa-se em uma região de divisores e, em alguns casos contém apenas a cabeceira das bacias.

Dessa forma, algumas bacias não estão representadas na sua totalidade, sendo que sua drenagem perene encontra-se fora da área de estudo. As bacias podem ser visualizadas na base cartográfica, apresentada no APÊNDICE A.

Este mapa foi importante, pois possibilitou a obtenção do índice de circularidade das bacias, utilizado para geração do mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial. Além disso, as bacias hidrográficas foram utilizadas como unidade espacial de análise dos resultados do mapa de fragilidade ambiental.

5.4. Vistorias de Campo

Nas vistorias de campo foram levantados dezesseis pontos de controle de superfície. Esses pontos foram registrados e georreferenciados utilizando GPS portátil, além da base cartográfica. A cada ponto registrado foram associadas anotações registradas em ficha de campo, e posteriormente digitalizada em formato de planilha Excel.

As anotações mencionadas referem-se a observações que permitem caracterizar o ponto de controle, além de identificar os locais selecionados para coleta de amostras deformadas e indeformadas das unidades de materiais inconsolidados.

Em alguns dos pontos também foram registradas fotos. Na Tabela 5.8, é mostrada a planilha elaborada contendo o identificador do ponto, as observações e fotos associadas. Os pontos de controle de superfície levantados foram agregados ao banco de dados relacional em SIG, previamente elaborado por Augusto Filho (2008).

Portanto, além das observações de superfície, o banco de dados contém pontos de sondagem à trado, sondagem elétrica vertical (SEV) e dispositivos do oleoduto (válvulas de segurança, pontos de tomada e retificador). Essas informações compõem a documentação de campo, que são mostradas no APÊNDICE A.

Tabela 5.8 – Pontos de controle levantados nas vistorias de campo.

Código	Ponto GPS	Observações	Fotos
1	287	Próximo ao limite superior da área de estudo.	406 - 407
2	288	Estaca 175,8, local para coleta de amostra indeformada.	408
3	289	Área de loteamento.	-
4	290	Talude contendo cobertura arenosa e S. R. Basalto jovem; Ponto de coleta de amostras deformadas e indeformadas.	409 - 412
5	292	Próximo à drenagem.	414 - 416
6	293	Área que apresenta erosão; Coletar amostras do S. R. Arenito Intertrapiano.	417 - 419
7	294	Ponto localizado dentro da área urbana.	-
8	295	Limite da área urbana.	-
9	296	Limite da área urbana.	420 - 424
10	297	Área com plantio de cana-de-açúcar.	-
11	298	Fragmento de mata.	-
12	299	Ponto de cumieira situado sobre basalto, com vista para região de Arenito Botucatu.	425 - 430
13	300	Próximo ao limite inferior da área de estudo.	431
14	301	Plantações de cana-de-açúcar.	-
15	302	Ponto situado entre dois fragmentos de mata.	432 - 434
16	303	Barragem artificial; Ponto de coleta de amostras de S. R. Arenito Botucatu.	435 - 439

Os pontos de observação apresentados, somados aos previamente levantados, totalizaram 84 locais de controle na área estudada (83,99 km²). Resultando em uma densidade média de amostragem de 1,00 ponto/km². De acordo com Zuquette (1987), essa densidade de amostragem é superior ao mínimo necessário para o mapeamento de detalhe na escala 1:25.000 (0,4 ponto/km²), que é a escala de impressão. Porém, é inferior ao mínimo definido para a escala 1:10.000 (10 pontos/km²), que é a escala original de trabalho.

Além do levantamento dos pontos, também foram verificados os usos predominantes na área, para atualizar o mapa de uso e ocupação. Verificou-se a ampla predominância das plantações de cana, como pode ser visto na Figura 5.8.

Observaram-se também os contatos das unidades de materiais inconsolidados, como o contato entre as unidades dos solos residuais de Basalto Maduro e de Arenito Intertrapiano, mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.8 – Foto ilustrando o principal tipo de uso da área de estudo (cana-de-açúcar).

Figura 5.9 – Foto identificando o contato entre duas unidades de materiais inconsolidados.

Foram também identificados alguns perfis típicos de alteração dos materiais inconsolidados, mostrados na Figura 5.10. E coletaram-se as amostras deformadas e indeformadas, que foram analisadas em laboratório. Na Figura 5.11 é mostrada uma amostra indeformada coletada no perfil de solo residual de Arenito Botucatu.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 5.10 – Fotos dos perfis de alteração: a) cobertura arenosa; b) solo residual basalto jovem; c) solo residual arenito intertrapiano; d) solo residual arenito Botucatu.

Figura 5.11 – Foto de amostra indeformada coletada do solo residual de arenito Botucatu.

5.5. Ensaios de Laboratório

Havia ensaios realizados previamente à pesquisa, que foram complementados. Portanto, além dos resultados dos ensaios obtidos nesta pesquisa, são apresentados alguns dos resultados encontrados por Augusto Filho (2008), permitindo compará-los.

5.5.1. Ensaios geotécnicos

Os resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos são de grande importância, pois são utilizados como parâmetro de entrada tanto para a confecção das curvas granulométricas, quanto para o cálculo dos índices físicos. Foram realizados dois ensaios por unidade de material inconsolidado amostrada, adotando-se o valor médio. Na Tabela 5.9 são apresentados os valores obtidos para cada unidade.

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de massa específica.

Unidade	Ensaio 1 (g/cm³)	Ensaio 2 (g/cm³)	Valor Médio (g/cm³)
S. R. Arenito Botucatu	2,633	2,626	2,630
S. R. Arenito Intertrapiano	2,632	2,62	2,626
S. R. Basalto Jovem	2,978	2,949	2,964
S. R. Basalto Maduro	2,92	2,883	2,902
Cobertura Arenosa	3,052	3,109	3,081

Os solos arenosos (arenitos Botucatu e Intertrapiano) e os argilosos (basalto jovem e maduro) apresentaram valores médios de 2,63 e 2,93g/cm³, respectivamente. E a cobertura arenosa apresentou os valores mais elevados de massa específica.

Augusto Filho (2008) também havia realizado esse ensaio em amostras das unidades de solo residual de Arenito Botucatu e de Basalto Maduro, os valores médios obtidos foram de 2,67 e 2,835 g/cm³, respectivamente. Os valores encontrados pelo autor são muito próximos dos obtidos na pesquisa.

Também foram realizados dois ensaios de granulometria conjunta por unidade de material inconsolidado amostrada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.10. Nela são mostradas as distribuições percentuais de cada fração (argila, silte e areia), bem como a classificação textural de acordo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). As curvas granulométricas de cada unidade são apresentadas nas Figuras 5.12 a 5.14.

Tabela 5.10 – Resultados dos ensaios de granulometria conjunta.

Unidade de material inconsolidado	% em peso das frações			Classificação textural
	Argila	Silte	Areia	
S. R. Arenito Botucatu (1)	5,4	2,7	91,9	Areia mal graduada com silte/argila – SP/SM/SC
S. R. Arenito Botucatu (2)	5,2	2,8	92,0	Areia mal graduada com silte/argila – SP/SM/SC
S. R. Arenito Intertrapiano (1)	5,4	1,7	92,9	Areia mal graduada com silte/argila – SP/SM/SC
S. R. Arenito Intertrapiano (2)	5,5	1,7	92,8	Areia mal graduada com silte/Argila – SP/SM/SC
S. R. Basalto Jovem (1)	23,1	56,9	20,0	Silte com areia – ML
S. R. Basalto Jovem (2)	28,7	56,3	15,0	Silte com areia – ML
S. R. Basalto Maduro (1)	29,2	45,8	25,0	Silte com areia – ML
S. R. Basalto Maduro (2)	23,1	46,9	30,0	Silte com areia – ML
Cobertura Arenosa (1)	27,4	42,6	30,0	Silte arenoso – ML
Cobertura Arenosa (2)	26,1	42,3	31,6	Silte arenoso – ML

Figura 5.12 – Curvas granulométricas dos solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano.

Figura 5.13 – Curvas granulométricas dos solos residuais de Basalto Jovem e Maduro.

Figura 5.14 – Curva granulométrica da cobertura arenosa.

Não foram realizados ensaios dos Limites de Atterberg. Por isso, foram utilizados dados da bibliografia para solos residuais, apresentados por Pinto et al. (1993), permitindo realizar a classificação textural SUCS.

Os solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano são areias típicas, apresentando porcentagens superiores a 90% dessa fração, e contém também um pouco da fração argila (aproximadamente, 5%).

Augusto Filho (2008) obteve resultados para a unidade de solo residual Arenito Botucatu, o autor realizou 43 ensaios em diversas profundidades e obteve como resultado uma classificação textural de areia mal graduada com silte ou argila. Para esta unidade, os resultados obtidos foram muitos próximos.

Os resultados do ensaio de granulometria conjunta dos solos residuais de basalto indicam predominância de finos (70 – 85%), especialmente da fração silte (45 – 55%), as frações argila e areia são próximas. Dessa forma, a classificação textural obtida foi silte com areia.

Augusto Filho (2008) realizou 40 ensaios em diferentes profundidades nos solos residuais de Basalto Maduro. O autor também obteve ampla predominância de finos (60 –

90%), porém dentre os finos a fração predominante foi de argila. A classificação textural foi argila com silte ou areia.

Em relação às coberturas arenosas, estas apresentaram classificação textural de silte arenoso e apesar de conter principalmente fração fina, verificou-se a presença de fração arenosa significativa, com areia fina, média, grossa e até mesmo pedregulho, como mostrado na Figura 5.14. Tal fato se justifica pela unidade ser de solo transportado e apresentar típica linha de seixos. Dessa forma, essa unidade merece atenção especial nas análises.

A partir das amostras indeformadas coletadas, também foi possível determinar os índices físicos de cada unidade. Havia interesse especial no índice de vazios, para auxiliar na análise do potencial à colapsividade. Na Tabela 5.11 são apresentados os índices obtidos para cada unidade. Cabe ressaltar que não foi possível obter amostra indeformada do solo residual de Basalto Jovem.

Os resultados permitem observar a similaridade de características entre as unidades de solos residuais de arenito analisadas, como já havia sido citado anteriormente. Corroborando o agrupamento das unidades para a maioria das análises, que serão realizadas. Em relação ao índice de vazios, essas unidades apresentam os menores valores obtidos, próximos a 0,6.

Ainda em relação ao índice de vazios, percebe-se que os solos residuais de Basalto Maduro apresentam valor intermediário (1,36) e as coberturas arenosas o mais elevado (1,85). Apesar do solo residual de Basalto Maduro apresentar valor intermediário, esse solo não apresenta elevado potencial de colapsividade, pois os vazios são, normalmente, pequenos e não geram uma boa condição de drenagem.

Tabela 5.11 – Índices físicos das unidades.

Unidade de material inconsolidado	Teor de umidade (w) %	Massa específica (ρ) g/cm ³	Massa específica seca (ρ _d) g/cm ³	Massa específica dos sólidos (ρ _s) g/cm ³	Porosidade (n) %	Grau de Saturação (Sr) %	Índice de Vazios (e)
S. R. Arenito Botucatu	4,18	1,74	1,67	2,63	36,40	19,21	0,57
S. R. Arenito Intertrapiano	3,75	1,72	1,65	2,63	36,99	16,77	0,59
S. R. Basalto maduro	27,04	1,56	1,23	2,90	57,69	57,55	1,36
Cobertura Arenosa	25,63	1,36	1,08	3,08	64,95	42,61	1,85

5.5.2. Ensaios Químicos

Foram realizados cinco ensaios de pH e Eh (potencial redox) por unidade de solo, a fim de se possibilitar a obtenção de mais dados para o cálculo de uma média. Os resultados encontrados, bem como a média são mostrados na Tabela 5.12.

Augusto Filho (2008) realizou os mesmos ensaios para as unidades de solos residuais de arenito Botucatu e de Basalto Maduro. Para os solos de arenito Botucatu o autor obteve valores médios de 5,12 e 315, para pH e Eh, respectivamente; e para os solos de Basalto Maduro, os valores de pH e Eh foram 6,30 e 248, respectivamente.

Segundo Alonso e Pannoni (2006), solos com pH acima de 6,00 apresentam reduzido potencial de corrosividade. Já em relação ao potencial redox (Eh), para o solo ser agressivo deve apresentar valores abaixo de 400mV, para solos arenosos e abaixo de 430mV, para solos argilosos.

Observando os critérios propostos pelos autores supracitados e os resultados obtidos, pode-se considerar que a unidade que apresenta maior potencial corrosivo é a de solo residual de Basalto Jovem, seguida pelos solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano, que apresentam praticamente o mesmo potencial. A cobertura arenosa vem logo em seguida e, por fim, o solo residual de Basalto Maduro, condicionado principalmente pelo pH mais elevado.

Tabela 5.12 – Resultados das análises de pH e Eh.

Unidade de material inconsolidado	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5		Média	
	pH	Eh (mV)	pH	Eh (mV)	pH	Eh (mV)	pH	Eh (mV)	pH	Eh (mV)	pH	Eh (mV)
S. R. Arenito Botucatu	5,12	342	5,23	350	5,20	293	5,27	323	5,29	309	5,22	323
S. R. Arenito Intertrapiano	5,12	331	5,42	358	5,46	310	5,38	307	5,40	291	5,36	319
S. R. Basalto Jovem	4,66	402	4,59	397	4,60	391	4,80	390	4,75	374	4,68	391
S. R. Basalto Maduro	5,90	350	6,17	317	5,77	328	5,74	307	5,67	291	5,85	319
Cobertura Arenosa	5,19	384	5,13	370	5,09	331	5,25	351	5,17	344	5,17	356

5.5.3. Ensaios Mineralógicos

Os ensaios mineralógicos foram realizados para as unidades de Basalto Jovem e Maduro, para a identificação dos prováveis argilominerais presentes. Os resultados das três análises são complementares, na medida em que cada ensaio indica a possibilidade de presença de alguns argilominerais. Dessa forma, apenas observando-se os três resultados juntos, é possível concluir quais argilominerais o solo contém.

No ensaio de Azul de Metileno foram anotados os valores de massa de amostra utilizada e de volume de solução de azul de metileno gasto para o teste resultar positivo. A partir desses valores, calcularam-se alguns parâmetros de interesse. Os resultados são mostrados na Tabela 5.13.

Com esses dados foi possível verificar diagramas específicos para o ensaio, apresentados por Pejon (1992). Observando esses diagramas, os solos residuais de Basalto Jovem e Maduro podem conter caulinita, ou 95% de caulinita e 5% de illita, ou ainda 100% de caulinita inativa. A única diferença é que o residual de Basalto Jovem pode conter também Haloisita $2H_2O$.

Tabela 5.13 – Resultados do ensaio de Azul de Metileno.

Dados Obtidos	Material ensaiado	
	S. R. Basalto Jovem	S. R. Basalto Maduro
Peso do material seco (g)	0,5250	0,5072
% de Argila	95,0000	93,0000
Concentração da solução	0,0047	0,0047
Volume de solução gasto (ml)	8,5000	4,5000
Capacidade troca catiônica (CTC)	7,6095	4,1700
Valor azul de metileno (Vb)	2,4286	1,3308
Vb/CTC	0,3191	0,3191
Superfície específica (SE)	59,4190	32,5611
Atividade da fração argila (Acb)	2,5564	1,4310
Acb/SE	0,0430	0,0439

O ensaio de análise térmica gravimétrica (ATG) apresentou algum erro (provavelmente na balança, que registrava a variação de massa). Por isso, serão analisados apenas os resultados da análise térmica diferencial (ATD). Este resultado é apresentado na forma de gráfico, no qual são apresentados picos endotérmicos ou exotérmicos com a variação da temperatura.

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam os gráficos para as duas unidades analisadas. Santos (1975) descreve o comportamento térmico de diferentes argilominerais. Dessa forma, é possível analisar cada pico apresentado e relacioná-lo com os argilominerais.

No gráfico do solo de Basalto Jovem, verifica-se um pico endotérmico acentuado a 125°C, que pode indicar a perda de água adsorvida da Montmorilonita. Em seguida, há um pico menos acentuado em 320°C, que pode indicar a perda de água de arestas da sepiolita.

Há um terceiro pico endotérmico a 585°C, que indica a perda de água de hidroxilas na illita. Finalmente, há um pico exotérmico em 924°C que indica a formação do quartzo mulita na montmorilonita ou formação do espinélio na illita.

Figura 5.15 – Resultado do ensaio de ATD para o solo residual de Basalto Jovem.

Figura 5.16 – Resultado do ensaio de ATD para o solo residual de Basalto Maduro.

Já no gráfico do solo de Basalto Maduro, o primeiro pico endotérmico próximo a 100°C representa a perda de água adsorvida da caulinita. O segundo pico endotérmico, a 330°C, pode indicar a perda de água de arestas da sepiolita. O terceiro pico endotérmico, em 600°C, refere-se à formação da metacaulinita da caulinita. O pico exotérmico a 800°C pode indicar a formação de forsterita da sepiolita.

Finalmente, apresentam-se os resultados do ensaio de Difração de Raios-X. Para cada amostra obtiveram-se três gráficos, que relacionam o ângulo de difração com a intensidade. Um gráfico refere-se à lâmina natural, outro à aquecida a 550°C e o terceiro à tratada com etilenoglicol. Para identificação dos argilominerais foi realizada uma análise conjunta dos três gráficos.

Foram analisados os cinco picos principais, ou seja, os cinco com maior intensidade e anotados seus respectivos ângulos de difração. Santos (1975) apresenta tabelas que relacionam o argilomineral com a distância basal. Para poder utilizá-las foi necessário converter os ângulos de difração (2θ) em distância basal (Å).

Na Tabela 5.14 são apresentados, para cada amostra, os cinco picos analisados, seus valores em distância basal e o comportamento dos mesmos quando aquecidos a 550°C e tratados com etilenoglicol. Nas Figuras 5.17 e 5.18 são apresentados os gráficos nos quais os picos foram identificados. A partir desses dados, foi possível proceder a identificação dos possíveis argilominerais.

Tabela 5.14 – Interpretação dos resultados do ensaio de Difração de Raios-X.

Amostra	Pico	2θ	Distância Basal (Å)	Aquecimento	Glicolação	Provável Argilomineral
S. R. de Basalto jovem	1	21,42	4,148	Intensifica	Sem efeito	Caulinita e Ilita
	2	35,76	2,511	Intensifica	Sem efeito	Ilita e Montmorilonita
	3	24,96	3,567	Intensifica	Sem efeito	Caulinita
	4	12,30	7,196	Intensifica	Sem efeito	Haloisita-2H ₂ O
	5	26,36	3,381	Sem efeito	Sem efeito	Quartzo
S. R. de Basalto maduro	1	18,30	4,848	Eliminação	Sem efeito	Ilita
	2	35,78	2,510	Amortiza	Sem efeito	Caulinita
	3	33,26	2,694	Sem efeito	Sem efeito	Ilita
	4	25,28	3,523	Sem efeito	Sem efeito	Clorita, Caulinita e Ilita
	5	12,20	7,255	Eliminação	Sem efeito	Caulinita, Haloisita-2H ₂ O

Figura 5.17 – Gráficos de Difração de Raios-X para solo residual de Basalto Jovem.

Figura 5.18 – Gráficos de Difração de Raios-X para solo residual de Basalto Maduro.

Observando os resultados dos três ensaios é possível concluir as composições mineralógicas mais prováveis de cada amostra. O solo residual de Basalto Maduro apresenta apenas caulinita e illita, podendo conter traços de clorita e haloisita-2H₂O. A predominância é de caulinita com baixa atividade. Essa composição se justifica pelo solo ser bem desenvolvido, de forma a apresentar principalmente argilominerais estáveis.

Já o solo residual de Basalto Jovem apresenta maior variedade de argilominerais. Os três principais são caulinita, illita e montmorilonita. Pode apresentar em menor quantidade Haloisita-2H₂O, sepiolita e ainda quartzo. Esse solo caracteriza-se por estar em processo ativo de desenvolvimento e, por isso, é natural que exista maior variedade de argilominerais.

5.6. Mapas de Suscetibilidade Intermediários

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos na geração dos mapas de suscetibilidade considerados, posteriormente, no mapa de fragilidade ambiental. São apresentados também os mapas temáticos com atributos utilizados e os pesos adotados.

5.6.1. Mapa de Suscetibilidade à Erosão

Os atributos e suas respectivas classes de atributos definidos como necessários para elaborar o mapa de suscetibilidade à erosão são mostrados na Figura 5.19. A divisão das classes foi baseada na literatura, conforme descrito no método. Além disso, os ensaios de laboratório auxiliaram no agrupamento dos solos pela classificação textural, que indica o potencial de erodibilidade de cada unidade.

Na Tabela 5.15 são apresentados os julgamentos paritários, realizados na matriz AHP, e os pesos resultantes para os atributos que compuseram o mapa de suscetibilidade à erosão.

Figura 5.19 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade à erosão.

Tabela 5.15 – Matriz AHP dos atributos utilizados no mapa de suscetibilidade à erosão.

MATRIZ RECÍPROCA

Atributos	Declividade	Curvatura	Uso	Tipo de Solo
Declividade	1/1	7/1	3/1	2/1
Curvatura	1/7	1/1	1/3	1/4
Uso	1/3	3/1	1/1	1/2
Tipo de Solo	1/4	4/1	2/1	1/1
SOMA	1,73	15,00	6,33	3,75

MATRIZ NORMALIZADA

Atributos	Declividade	Curvatura	Uso	Tipo de Solo	AUTOVETOR
Declividade	0,58	0,47	0,47	0,53	0,51
Curvatura	0,08	0,07	0,05	0,07	0,07
Uso	0,19	0,20	0,16	0,13	0,17
Tipo de Solo	0,14	0,27	0,32	0,27	0,25

ANÁLISE DE ERRO

$\lambda_{\text{máx}}$	3,91
IC	0,03
ICR	0,90
RC	0,03

3,37%

Como resultado obtiveram-se os autovetores, que representam a ordem de prioridade dos atributos. Dessa forma, declividade aparece como fator mais importante (51%), seguida pelo tipo de solo (25%), uso e ocupação (17%) e curvatura (7%). Esse resultado está consistente com os julgamentos realizados, o que pode ser comprovado pela razão de consistência (RC) de 3,37%. De acordo com o método, valores até 10% são aceitáveis.

De fato, a declividade exerce grande influência no processo erosivo, uma vez que condiciona a dinâmica hidrológica e afeta características do solo (segundo mais importante). O solo tem sua importância traduzida pela sua textura e coesão. Já o uso indica o grau de exposição do solo e a curvatura condiciona regiões acumuladoras ou dissipadoras de água.

Da mesma forma, cada classe de atributo foi ponderada individualmente pelo método AHP para obtenção de pesos. Na Tabela 5.16 são mostrados os resultados da matriz AHP para as classes de declividade.

Tabela 5.16 – Matriz AHP das classes de declividade para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Declividade	< 3%	3 - 6 %	6 - 12%	12 - 20%	> 20%
< 3%	1/1	1/3	1/5	1/7	1/9
3 - 6 %	3/1	1/1	1/3	1/5	1/7
6 - 12%	5/1	3/1	1/1	1/3	1/5
12 - 20%	7/1	5/1	3/1	1/1	1/5
> 20%	9/1	7/1	5/1	3/1	1/1
SOMA	25,00	16,33	9,53	4,68	1,65

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Declividade	< 3%	3 - 6 %	6 - 12%	12 - 20%	> 20%	AUTOVETOR
< 3%	0,04	0,02	0,02	0,03	0,07	0,04
3 - 6 %	0,12	0,06	0,03	0,04	0,09	0,07
6 - 12%	0,20	0,18	0,10	0,07	0,12	0,14
12 - 20%	0,28	0,31	0,31	0,21	0,12	0,25
> 20%	0,36	0,43	0,52	0,64	0,60	0,50

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\text{máx}}$	5,30
IC	0,08
ICR	1,12
RC	0,07 6,79%

Considerou-se que quanto maior a declividade, maior seria o potencial para gerar erosão. Dessa forma, as cinco classes receberam ordem de importância crescente com a declividade. Como resultado, obteve-se como ordem de prioridades: declividades superiores a 20% (50%), em seguida, entre 12 e 20% (25%), de 6 a 12% (14%), de 3 a 6% (7%) e finalmente declividades inferiores a 3% (4%). O erro obtido também foi aceitável, de 6,79%, inferior ao limite.

Procedeu-se com a ponderação das classes de tipo de solo, apresentada na Tabela 5.17. A ponderação foi pautada, principalmente, pelo potencial de erodibilidade dos solos. Por isso, os solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano receberam maior importância nos julgamentos. Pelos ensaios realizados, essas duas unidades podem ser consideradas iguais, e portanto, receberam a mesma importância.

Em seguida, foi considerada a cobertura arenosa, por conter fração de areia significativa. Os depósitos aluvionares não foram analisados, porém receberam baixa importância, para erosão pluvial. Por último, consideraram-se os solos residuais de basalto jovem e maduro, por apresentarem baixo potencial de erodibilidade.

Tabela 5.17 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto 1/2	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertrapiano
Depósitos Aluvionares	1/1	2/1	1/5	1/8	1/8
S. R. Basalto Jovem/Maduro	1/2	1/1	1/7	1/9	1/9
Cobertura Arenosa	5/1	7/1	1/1	1/2	1/2
S. R. Arenito Botucatu	8/1	9/1	2/1	1/1	1/1
S. R. Arenito Intertrapiano	8/1	9/1	2/1	1/1	1/1
SOMA	22,50	28,00	5,34	2,74	2,74

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto 1/2	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertrapiano	AUTOVETOR
Depósitos Aluvionares	0,04	0,07	0,04	0,05	0,05	0,05
S. R. Basalto Jovem/Maduro	0,02	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03
Cobertura Arenosa	0,22	0,25	0,19	0,18	0,18	0,20
S. R. Arenito Botucatu	0,36	0,32	0,37	0,37	0,37	0,36
S. R. Arenito Intertrapiano	0,36	0,32	0,37	0,37	0,37	0,36

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\max}$	5,08	
IC	0,02	
ICR	1,12	
RC	0,02	1,69%

A ordem de prioridades resultante foi solo residual de arenito Botucatu e Intertrapiano (36% cada), cobertura arenosa (20%), depósitos aluvionares (5%) e solos residuais de basalto (3%). A análise de consistência (RC = 1,69%) indica resultados coerentes com os julgamentos, pois o erro está dentro do limite aceitável.

Em seguida, foi realizada a ponderação das classes de uso e ocupação, como mostrado na Tabela 5.18. Essa ponderação relacionou o tipo de uso com o grau de exposição do solo. Ou seja, quanto mais exposto estiver o solo maior será o potencial erosivo.

Portanto, áreas de solo exposto foram consideradas as mais importantes para erosão e áreas impermeabilizadas (área urbana, vias, etc.) as com menor potencial. As áreas de pastagem também foram consideradas com alto grau de exposição de solo, seguidas pelas áreas de cultura. As áreas de mata e reflorestamento foram consideradas com baixo potencial erosivo, por se constituírem em barreira vegetal ao escoamento superficial.

Tabela 5.18 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Uso	Mata / Reflorestamento	Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	Solo Exposto	Pastagem / LT	Área Urbana / Vias / Ind.
Mata / Reflorestamento	1/1	1/3	1/7	1/5	3/1
Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	3/1	1/1	1/5	1/3	5/1
Solo Exposto	7/1	5/1	1/1	3/1	9/1
Pastagem / LT	5/1	3/1	1/3	1/1	7/1
Área Urbana / Vias / Ind.	1/3	1/5	1/9	1/7	1/1
SOMA	16,33	9,53	1,79	4,68	25,00

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	Mata / Reflorestamento	Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	Solo Exposto	Pastagem / LT	Área Urbana / Vias / Ind.	AUTOVETOR
Mata / Reflorestamento	0,06	0,03	0,08	0,04	0,12	0,07
Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	0,18	0,10	0,11	0,07	0,20	0,14
Solo Exposto	0,43	0,52	0,56	0,64	0,36	0,50
Pastagem / LT	0,31	0,31	0,19	0,21	0,28	0,26
Área Urbana / Vias / Ind.	0,02	0,02	0,06	0,03	0,04	0,03

ANÁLISE DE ERRO		
λ_{máx}	5,33	
IC	0,08	
ICR	1,12	
RC	0,07	7,42%

Como resultado de prioridades obteve-se solo exposto com 50% de importância; pastagens e LTs com 26%; culturas e loteamentos com 14%; mata e reflorestamento com 7%; e área urbana, vias e zonas industriais com 3%. A análise da consistência, também foi dentro do limite, com erro de 7,42%.

Finalmente, avaliaram-se as classes de curvatura terreno. Na Tabela 5.19 é mostrada essa ponderação. Neste caso, as superfícies côncavas foram consideradas com maior potencial erosivo, seguidas pelas convexas e as planas foram consideradas com menor potencial.

Como resultado obteve-se ordem de prioridades de superfícies côncavas (78%), seguidas pelas convexas (14%) e por último as planas (8%). E a análise de consistência resultou em erro de 1,5%.

Tabela 5.19 – Matriz AHP das classes de curvatura para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA				
Classes de Curvatura	Côncava	Plana	Convexa	
Côncava	1/1	9/1	6/1	
Plana	1/9	1/1	1/2	
Convexa	1/6	2/1	1/1	
SOMA	1,28	12,00	7,50	

MATRIZ NORMALIZADA				
Classes de Curvatura	Côncava	Plana	Convexa	AUTOVETOR
Côncava	0,78	0,75	0,80	0,78
Plana	0,09	0,08	0,07	0,08
Convexa	0,13	0,17	0,13	0,14

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\text{máx}}$	3,02
IC	0,01
ICR	0,58
RC	0,02 1,50%

A partir dos pesos de cada atributo e cada classe de atributo combinados foi possível gerar o mapa de suscetibilidade à erosão, conforme descrito no método. O mapa foi dividido em cinco classes, utilizando o método *Natural Breaks*, apresentadas na Tabela 5.20. Além disso, um recorte representativo do mapa é apresentado na Figura 5.20, no qual também são apresentadas algumas feições erosivas existentes, a fim de permitir validar o resultado.

Verificou-se que na área de estudo as classes de suscetibilidade à erosão predominantes são baixa e média. Juntas somam pouco mais de 64% em área. Em seguida, se apresenta a classe alta com 18% e a classe muito baixa com 14,5%. A classe muito alta se apresenta em apenas 3,4% da área.

As duas classes mais críticas se concentram em regiões com alta declividade e de solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano. Esse resultado parece coerente, já que essas duas classes representam juntas 76% de importância para erosão. Além disso, a soma ponderada utilizada para combinar os atributos se mostrou adequada, pois permitiu que os atributos de maior peso apresentassem maior importância.

O mapa gerado pôde ser validado, pois feições erosivas levantadas no estudo de Augusto Filho (2008) encontraram-se justamente sobre as áreas com suscetibilidade à erosão alta e muito alta, como pode ser observado no recorte apresentado na Figura 5.20. Dessa forma, pode ser concluído que os atributos selecionados foram representativos e a ponderação realizada foi adequada.

Tabela 5.20 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade à erosão.

Suscetibilidade à erosão	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	12188832	14,5
Baixa	22720208	27,1
Média	31046048	37,0
Alta	15070176	18,0
Muito Alta	2838128	3,4

Figura 5.20 – Mapa de suscetibilidade à erosão.

5.6.2. Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa

Os mapas temáticos utilizados na geração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa foram os mesmos do mapa de suscetibilidade à erosão. A única distinção se fez nas classes de declividade. Neste caso, apenas declividades acima de 20% começam a interferir no processo de forma significativa. A divisão final pode ser vista no fluxograma apresentado na Figura 5.21.

A atribuição de pesos em matriz AHP foi realizada a partir desses mapas temáticos, mostrada na Tabela 5.21. A lógica para realização dos julgamentos foi similar a do mapa de suscetibilidade à erosão. A declividade foi considerada o atributo mais importante e a curvatura o menos. A diferença foi nas classes de uso e ocupação e tipo de solo que se inverteram. Sendo que para movimentos de massa o uso foi considerado mais importante.

A ordem de prioridades (pesos) resultante foi declividade (49%), seguida por uso (24%), tipo de solo (17%) e, por último, curvatura (10%). A verificação da consistência resultou em erro 0,9%.

Figura 5.21 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

Tabela 5.21 – Matriz AHP dos atributos utilizados no mapa de movimentos de massa.

MATRIZ RECÍPROCA

Atributos	Declividade	Curvatura	Uso	Tipo de Solo
Declividade	1/1	5/1	2/1	3/1
Curvatura	1/6	1/1	1/2	1/2
Uso	1/2	2/1	1/1	3/2
Tipo de Solo	1/3	2/1	2/3	1/1
SOMA	2,00	10,00	4,17	6,00

MATRIZ NORMALIZADA

Atributos	Declividade	Curvatura	Uso	Tipo de Solo	AUTOVETOR
Declividade	0,50	0,50	0,48	0,50	0,49
Curvatura	0,08	0,10	0,12	0,08	0,10
Uso	0,25	0,20	0,24	0,25	0,24
Tipo de Solo	0,17	0,20	0,16	0,17	0,17

ANÁLISE DE ERRO

$\lambda_{\text{máx}}$	3,98	
IC	0,01	
ICR	0,90	
RC	0,01	0,90%

Procedeu-se com a ponderação das classes de declividade, que é apresentada na Tabela 5.22. Considerou-se que quanto maior a declividade, maior o potencial de causar movimentos de massa.

Como resultado, obtiveram-se declividades superiores a 60% com 41% de importância; de 50 a 60% com peso de 27%; de 30 a 50% com peso de 19%; de 20 a 30% com peso de 9%; e declividades inferiores a 20% com peso de 4%.

Houve destaque significativo para declividades superiores a 60%, que de fato tendem a condicionar mais fortemente o processo de movimentos de massa. A verificação de consistência garantiu análise coerente, com razão de consistência de 0,32%.

Tabela 5.22 – Matriz AHP das classes de declividade para movimentos de massa.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Declividade	< 20%	20 - 30%	30 - 50%	50 - 60%	> 60%
< 20%	1/1	1/2	1/5	1/7	1/9
20 - 30%	2/1	1/1	1/2	1/3	1/4
30 - 50%	5/1	2/1	1/1	1/2	1/2
50 - 60%	7/1	3/1	3/2	1/1	1/2
> 60%	9/1	4/1	2/1	2/1	1/1
SOMA	24,00	10,50	5,20	3,98	2,36

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Declividade	< 20%	20 - 30%	30 - 50%	50 - 60%	> 60%	AUTOVETOR
< 20%	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
20 - 30%	0,08	0,10	0,10	0,08	0,11	0,09
30 - 50%	0,21	0,19	0,19	0,13	0,21	0,19
50 - 60%	0,29	0,29	0,29	0,25	0,21	0,27
> 60%	0,38	0,38	0,38	0,50	0,42	0,41

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\text{máx}}$	4,99
IC	0,00
ICR	1,12
RC	0,00 0,32%

Em seguida, foram analisadas as classes de uso e ocupação, conforme mostrado na Tabela 5.23. A análise foi, mais uma vez, parecida com a do mapa de erosão, considerando o grau de exposição do solo.

Contudo, para movimentos de massa a classe de mata e reflorestamento foi considerada mais importante do que para erosão. Essa consideração está relacionada ao possível “efeito alavanca” que árvores podem causar e contribuir para a ocorrência dos movimentos de massa.

A classe que resultou em maior peso para movimentos de massa foi a de solo exposto (48%); seguida por pastagem e LT (26%); mata reflorestamento (13%); culturas, campo sujo, loteamento e propriedades rurais (8%) e com menor peso a classe de área urbana, vias e indústrias (5%). Os julgamentos foram coerentes, já que a razão de consistência foi de 0,83%.

Tabela 5.23 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para movimentos de massa.

MATRIZ RECÍPROCA						
Classes de Uso	Mata / Reflorestamento	Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	Solo Exposto	Pastagem / LT	Área Urbana / Vias / Ind.	
Mata / Reflorestamento	1/1	2/1	1/4	1/2	3/1	
Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	1/2	1/1	1/6	1/4	2/1	
Solo Exposto	4/1	6/1	1/1	2/1	9/1	
Pastagem / LT	2/1	4/1	1/2	1/1	5/1	
Área Urbana / Vias / Ind.	1/3	1/2	1/9	1/5	1/1	
SOMA	7,83	13,50	2,03	3,95	20,00	

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	Mata / Reflorestamento	Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	Solo Exposto	Pastagem / LT	Área Urbana / Vias / Ind.	AUTOVETOR
Mata / Reflorestamento	0,13	0,15	0,12	0,13	0,15	0,13
Cultura / Campo Sujo / Loteamento / Prop.	0,06	0,07	0,08	0,06	0,10	0,08
Solo Exposto	0,51	0,44	0,49	0,51	0,45	0,48
Pastagem / LT	0,26	0,30	0,25	0,25	0,25	0,26
Área Urbana / Vias / Ind.	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\max}$	5,04	
IC	0,01	
ICR	1,12	
RC	0,01	0,83%

Os julgamentos paritários realizados para a classe de tipos de solo são apresentados na Tabela 5.24. A ponderação foi realizada considerando, principalmente, a classificação textural. A exceção foi da cobertura arenosa, que foi considerada mais importante por ser um material transportado e, conseqüentemente, encontrar-se na condição de resistência residual.

A ordem de prioridades final resultou na cobertura arenosa, com 37%, seguida pelos arenitos Botucatu e Intertrapiano, com 29 e 23%, respectivamente. Os solos residuais de basalto apresentaram peso de 7% e os depósitos aluvionares 4%.

Como citado acima, pela forma de ocorrência na área de estudo das coberturas arenosas, estas apresentam maior potencial. Pelo mesmo motivo, os depósitos aluvionares podem ser justificados com menor potencial (associado às drenagens). O erro resultante dos julgamentos pode ser aceito, por estar abaixo dos 10% limites.

Por fim, foi feita a ponderação das classes de curvatura do terreno, mostrada na Tabela 5.25. Neste caso, as superfícies retilíneas foram consideradas as mais importantes, seguidas pelas convexas, e as côncavas com menor importância, de acordo com os resultados obtidos por IPT (1988) e Passarella et al. (2008).

Tabela 5.24 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para movimentos de massa.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto 1/2	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertrapiano
Depósitos Aluvionares	1/1	1/2	1/9	1/7	1/6
S. R. Basalto Jovem/Maduro	2/1	1/1	1/5	1/4	1/3
Cobertura Arenosa	9/1	5/1	1/1	1/1	2/1
S. R. Arenito Botucatu	7/1	4/1	1/1	1/1	1/1
S. R. Arenito Intertrapiano	6/1	3/1	1/2	1/1	1/1
SOMA	25,00	13,50	2,81	3,39	4,50

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto 1/2	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertrapiano	AUTOVETOR
Depósitos Aluvionares	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
S. R. Basalto Jovem/Maduro	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Cobertura Arenosa	0,36	0,37	0,36	0,29	0,44	0,37
S. R. Arenito Botucatu	0,28	0,30	0,36	0,29	0,22	0,29
S. R. Arenito Intertrapiano	0,24	0,22	0,18	0,29	0,22	0,23

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\max}$	5,04	
IC	0,01	
ICR	1,12	
RC	0,01	0,81%

Tabela 5.25 – Matriz AHP das classes de curvatura do terreno para movimentos de massa.

MATRIZ RECÍPROCA			
Classes de Curvatura	Côncava	Plana	Convexa
Côncava	1/1	1/5	1/3
Plana	5/1	1/1	2/1
Convexa	3/1	1/2	1/1
SOMA	9,00	1,70	3,33

MATRIZ NORMALIZADA				
Classes de Curvatura	Côncava	Plana	Convexa	AUTOVETOR
Côncava	0,11	0,12	0,10	0,11
Plana	0,56	0,59	0,60	0,58
Convexa	0,33	0,29	0,30	0,31

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\max}$	3,00
IC	0,00
ICR	0,58
RC	0,00 0,42%

As superfícies planas apresentaram 58% de peso, seguidas pelas convexas, com 31% e por último as côncavas, com apenas 11%. A razão de consistência obtida também foi bastante baixa (0,42%).

Todos os pesos obtidos foram atribuídos aos mapas temáticos para geração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. O resultado foi tabulado por distribuição de área, classificado por *Natural Breaks*, e é mostrado na Tabela 5.26. Um recorte do mapa gerado também é apresentado na Figura 5.22.

Houve predominância das classes muito baixa e baixa, ocupando juntas mais de 84% da área. As áreas mais críticas somaram menos de 2% de área. De fato, na área de estudo a ocorrência de movimentos de massa é muito restrita. Dessa forma, verifica-se que a área de estudo apresenta, em geral, baixa suscetibilidade aos movimentos de massa.

Observando o recorte do mapa apresentado, verifica-se que a mesma tendência do mapa de erosão é seguida, porém as áreas mais críticas ocupam áreas menos extensas. O fator que coordena o processo é a declividade, ou seja, as áreas mais críticas se concentram nas declividades mais elevadas.

Pelo fato de na área existir poucos indícios de movimentos de massa e, por estes estarem associados às declividades elevadas, o mapa gerado pode ser considerado coerente com a realidade.

Tabela 5.26 – Distribuição por área das classes de suscetibilidade à movimentos de massa.

Suscetibilidade à movimentos de massa	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	30740720	36,66
Baixa	39995568	47,70
Média	11464320	13,67
Alta	1453280	1,73
Muito Alta	201824	0,24

Figura 5.22 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

5.6.3. Mapa de Suscetibilidade ao Escoamento Superficial

As classes de atributos selecionadas para elaborar o mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial são mostradas na Figura 5.23. O agrupamento das classes foi feito considerando fatores que influenciam na infiltração da água no solo, de forma que quanto menos água infiltrar maior será o escoamento superficial.

Para isso, foram selecionados os atributos de tipo de solo, uso e cobertura e declividade. Foi também selecionado o índice de circularidade da bacia, que pode ser relacionado com tempo de concentração da bacia.

As classes de declividade foram agrupadas de acordo com o proposto por Embrapa (1979), conforme citado no método. As classes de uso e ocupação foram divididas considerando fatores que possam reter ou contribuir para o fluxo de escoamento superficial. As classes de tipo de solo foram consideradas pelo potencial de infiltração traduzido, principalmente, pela textura do solo.

Figura 5.23 – Atributos e suas respectivas classes definidos para o mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial.

Para realizar os julgamentos dos atributos desse mapa foi consultado trabalho apresentado por Liporaci et al. (1999), além das observações específicas da área de estudo. Esses julgamentos são apresentados na Tabela 5.27. No trabalho citado, é elaborada a carta de potencial ao escoamento superficial, utilizando AHP.

A declividade foi considerada como o fator que se sobrepõe aos outros, por controlar a dinâmica do fluxo superficial. Em seguida, foi considerado o índice de circularidade, pois ele reflete o tempo de concentração da bacia sendo um indicativo do seu potencial de cheias.

Os julgamentos para o tipo de solo e o uso foram feitos em função da capacidade de infiltração. O uso recebeu maior importância, pois apenas quando houver solo exposto, será o tipo de solo que condiciona o escoamento. Nos outros casos, o uso tem maior influência.

A partir desses julgamentos, a ordem de prioridades resultante foi declividade (44%), uso e ocupação (24%), índice de circularidade (22%) e tipo de solo (10%). Essa ponderação foi considerada coerente, pois o valor da razão de consistência foi de 0,87%.

Tabela 5.27 – Matriz AHP dos atributos utilizados no mapa de escoamento superficial.

MATRIZ RECÍPROCA					
Atributos	Declividade	Índice de Circularidade	Uso	Tipo de Solo	
Declividade	1/1	2/1	2/1	4/1	
Índice de Circularidade	1/2	1/1	1/1	2/1	
Uso	1/2	1/1	1/1	3/1	
Tipo de Solo	1/4	1/2	1/3	1/1	
SOMA	2,25	4,50	4,33	10,00	

MATRIZ NORMALIZADA					
Atributos	Declividade	Índice de Circularidade	Uso	Tipo de Solo	AUTOVETOR
Declividade	0,44	0,44	0,46	0,40	0,44
Índice de Circularidade	0,22	0,22	0,23	0,20	0,22
Uso	0,22	0,22	0,23	0,30	0,24
Tipo de Solo	0,11	0,11	0,08	0,10	0,10

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\max}$	4,02	
IC	0,01	
ICR	0,90	
RC	0,01	0,87%

Procedeu-se a ponderação das classes de declividade, apresentada na Tabela 5.28. Considerou-se a declividade de forma crescente, ou seja, quanto maior o valor da classe, maior a importância para o processo de escoamento superficial.

As cinco classes de declividade receberam de forma decrescente os seguintes pesos 45%, 26%, 16%, 9% e 4%. Este resultado representa um incremento de, aproximadamente, duas vezes com aumento de classe de declividade. As ponderações podem ser consideradas satisfatórias, na medida em que o erro foi de apenas 0,61%.

Na ponderação das classes de índice de circularidade considerou-se que quanto mais próximo de 1,0 for o índice, mais circular será a bacia. Consequentemente, menor será o tempo de concentração e haverá maior volume de água escoando em um ponto ao mesmo tempo. Essa ponderação é mostrada Tabela 5.29.

Buscou-se aumentar a importância de forma proporcional ao aumento do valor da classe. Como resultado, obteve-se a classe com valor acima de 0,65, com 39% de importância e a com valor inferior a 0,31, com 4%. As outras classes intermediárias tiveram pesos mais próximos, por não apresentarem grande variação nos valores do índice de circularidade. O erro também foi baixo (0,53%), confirmando a consistência das análises.

Tabela 5.28 – Matriz AHP das classes de declividade para escoamento superficial.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Declividade	< 3%	3 - 8 %	8 - 20%	20 - 45%	> 45%
< 3%	1/1	1/2	1/4	1/6	1/9
3 - 8 %	2/1	1/1	1/2	1/3	1/5
8 - 20%	4/1	2/1	1/1	1/2	1/3
20 - 45%	6/1	3/1	2/1	1/1	1/2
> 45%	9/1	5/1	3/1	2/1	1/1
SOMA	22,00	11,50	6,75	4,00	2,14

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Declividade	< 3%	3 - 8 %	8 - 20%	20 - 45%	> 45%	AUTOVETOR
< 3%	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
3 - 8 %	0,09	0,09	0,07	0,08	0,09	0,09
8 - 20%	0,18	0,17	0,15	0,13	0,16	0,16
20 - 45%	0,27	0,26	0,30	0,25	0,23	0,26
> 45%	0,41	0,43	0,44	0,50	0,47	0,45

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\max}$	5,03
IC	0,01
ICR	1,12
RC	0,01

0,61%

Tabela 5.29 – Matriz AHP das classes de índice de circularidade para escoamento superficial.

MATRIZ RECÍPROCA						
Classes de IC	< 0,31	0,31 - 0,39	0,39 - 0,57	0,57 - 0,65	> 0,65	
< 0,31	1/1	1/3	1/5	1/6	1/8	
0,31 - 0,39	3/1	1/1	1/2	1/2	1/3	
0,39 - 0,57	5/1	2/1	1/1	1/1	1/2	
0,57 - 0,65	6/1	2/1	1/1	1/1	1/2	
> 0,65	8/1	3/1	2/1	2/1	1/1	
SOMA	23,00	8,33	4,70	4,67	2,46	

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de IC	< 0,31	0,31 - 0,39	0,39 - 0,57	0,57 - 0,65	> 0,65	AUTOVETOR
< 0,31	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
0,31 - 0,39	0,13	0,12	0,11	0,11	0,14	0,12
0,39 - 0,57	0,22	0,24	0,21	0,21	0,20	0,22
0,57 - 0,65	0,26	0,24	0,21	0,21	0,20	0,23
> 0,65	0,35	0,36	0,43	0,43	0,41	0,39

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\text{máx}}$	5,02
IC	0,01
ICR	1,12
RC	0,01
	0,53%

Foram então realizados os julgamentos das classes de tipo de solo. Considerou-se o agrupamento proposto pelo SCS-USDA, citado no método, para condicionar a importância para o escoamento superficial.

Além disso, a unidade de depósitos aluvionares, que não pôde ser analisada em laboratório foi considerada com potencial mediano. Os julgamentos realizados para as classes de solo estão apresentados na matriz AHP, mostrada na Tabela 5.30.

As unidades de solo residual de basalto apresentaram o maior peso (35%), seguidas pela cobertura arenosa (28%). Os depósitos aluvionares apresentaram peso muito próximo das coberturas arenosas (24%) e os solos residuais de arenito os menores pesos (9% para Intertrapiano e 4% para Botucatu). O erro associado aos julgamentos foi de apenas 0,97%.

Tabela 5.30 – Matriz AHP das classes de solo para escoamento superficial.

MATRIZ RECÍPROCA						
Classes de Solo	Grupo A - Arenito Botucatu	Grupo B - Arenito Intertrapiano	Grupo C - Depósitos Aluvionares	Grupo D - Coberturas Arenosas	Grupo E - S. R. Basalto Jovem/Maduro	
Grupo A - Arenito Botucatu	1/1	1/2	1/6	1/7	1/8	
Grupo B - Arenito Intertrapiano	2/1	1/1	1/3	1/3	1/4	
Grupo C - Depósitos Aluvionares	6/1	3/1	1/1	1/1	1/2	
Grupo D - Coberturas Arenosas	7/1	3/1	1/1	1/1	1/1	
Grupo E - S. R. Basalto Jovem/Maduro	8/1	4/1	2/1	1/1	1/1	
SOMA	24,00	11,50	4,50	3,48	2,88	

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Solo	Grupo A - Arenito Botucatu	Grupo B - Arenito Intertrapiano	Grupo C - Depósitos Aluvionares	Grupo D - Coberturas Arenosas	Grupo E - S. R. Basalto Jovem/Maduro	AUTOVETOR
Grupo A - Arenito Botucatu	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Grupo B - Arenito Intertrapiano	0,08	0,09	0,07	0,10	0,09	0,09
Grupo C - Depósitos Aluvionares	0,25	0,26	0,22	0,29	0,17	0,24
Grupo D - Coberturas Arenosas	0,29	0,26	0,22	0,29	0,35	0,28
Grupo E - S. R. Basalto Jovem/Maduro	0,33	0,35	0,44	0,29	0,35	0,35

ANÁLISE DE ERRO		
λ_{máx}	5,04	
IC	0,01	
ICR	1,12	
RC	0,01	0,97%

A análise das classes de uso e ocupação é mostrada na Tabela 5.31. Considerou-se o tipo de uso como facilitador (impermeabilização) ou como barreira (vegetação) para o escoamento superficial. A classe de solo exposto também recebeu peso elevado, pois nesse caso é o tipo de solo que condiciona o comportamento.

Como resultado, os usos de área urbana, vias e indústrias receberam maior peso (41%), seguidos pelo solo exposto (29%), pastagem, loteamento e LT (19%), culturas (7%) e mata e reflorestamento (4%). A análise de consistência resultou em erro de 1,51%, permitindo considerar os julgamentos coerentes.

Com todos os pesos obtidos, foi possível combinar os mapas temáticos e gerar o mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial. A distribuição de área das classes foi sumarizada para facilitar a visualização do resultado, e são apresentadas na Tabela 5.32. O recorte representativo do mapa é apresentado na Figura 5.24.

Tabela 5.31 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para escoamento superficial.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Uso	Mata / Reflorestamento	Cultura	Solo Exposto	Campo Sujo / Pastagem / Loteamento / LT / Prop.	Área Urbana / Vias / Ind.
Mata / Reflorestamento	1/1	1/2	1/7	1/5	1/9
Cultura	2/1	1/1	1/4	1/3	1/5
Solo Exposto	7/1	4/1	1/1	2/1	1/2
Campo Sujo / Pastagem / Loteamento / LT / Prop.	5/1	3/1	1/2	1/1	1/2
Área Urbana / Vias / Ind.	9/1	5/1	2/1	2/1	1/1
SOMA	24,00	13,50	3,89	5,53	2,31

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	Mata / Reflorestamento	Cultura	Solo Exposto	Campo Sujo / Pastagem / Loteamento / LT / Prop.	Área Urbana / Vias / Ind.	AUTOVETOR
Mata / Reflorestamento	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
Cultura	0,08	0,07	0,06	0,06	0,09	0,07
Solo Exposto	0,29	0,30	0,26	0,36	0,22	0,29
Campo Sujo / Pastagem / Loteamento / LT / Prop.	0,21	0,22	0,13	0,18	0,22	0,19
Área Urbana / Vias / Ind.	0,38	0,37	0,51	0,36	0,43	0,41

ANÁLISE DE ERRO		
λ_{máx}	5,07	
IC	0,02	
ICR	1,12	
RC	0,02	1,51%

Tabela 5.32 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade ao escoamento superficial.

Suscetibilidade ao escoamento superficial	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	14329296	17,1
Baixa	22434336	26,7
Média	27100800	32,3
Alta	15902064	19,0
Muito Alta	4096448	4,9

As classes predominantes são de baixa e média suscetibilidade ao escoamento superficial, com aproximadamente, 27% e 32%, respectivamente. A classe com alto escoamento superficial se concentra em declividades médias combinadas a usos ou solos com baixo potencial de infiltração. A classe com suscetibilidade muito alta se restringe a apenas 4,9% da área e se localiza nas declividades mais acentuadas.

5.6.4. Mapa de suscetibilidade à Corrosão

O mapa de suscetibilidade à corrosão tem especial importância para a área de estudo, pois esse processo pode ter grande influência na ocorrência de vazamentos no oleoduto. As classes de atributos utilizadas para elaboração do mapa são mostradas na Figura 5.25.

Os tipos de solo foram agrupados de acordo com os resultados das análises químicas de pH e Eh. O nível d'água subterrânea foi considerado relativo à profundidade média de assentamento do oleoduto para refletir oscilações do N. A. que afetem o duto. Dessa forma, foram agrupadas três classes de profundidade: até 1,5m, entre 1,5 e 5m e superiores a 5m. Essas profundidades estão associadas às distâncias das drenagens perenes (< 20m; 20 – 100m; > 100m, respectivamente), conforme descrito anteriormente.

Com a definição das classes de atributo foi possível realizar as ponderações necessárias para obtenção dos pesos finais. Neste caso, como são apenas dois atributos não foi aplicado o método AHP para ponderação deles, foi apenas definido um peso para cada um. No caso, definiu-se peso de 80% para tipo de solo e 20% para o nível freático, pois é o solo, através do seu valor de pH, que condiciona o processo.

Figura 5.25 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade à corrosão.

Primeiro, realizou-se a ponderação em matriz AHP para as classes de tipo de solo, mostrada na Tabela 5.33. O critério para atribuir a importância relativa de cada classe foram os valores de pH e Eh médios.

Dessa forma, o solo residual de Basalto Jovem foi considerado com maior potencial, seguido dos solos de arenito Botucatu e Intertrapiano, cobertura arenosa, solo residual de Basalto Maduro e os depósitos aluvionares foram considerados menos importantes.

Como resultado obtiveram-se os seguintes pesos: solo residual de Basalto Jovem (39%), solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano (33%), cobertura arenosa (15%), solo residual de Basalto Maduro (9%) e depósitos aluvionares (4%). A análise de consistência resultou em erro moderado de 6,15%.

As classes de distância das drenagens perenes foram julgadas, conforme mostrado na Tabela 5.34. Os julgamentos relativos ao nível freático foram feitos considerando as oscilações do N. A. em relação ao oleoduto. Dessa forma, com N. A. até 1,5m as variações ocorrem justamente na profundidade em que se encontra o duto e o processo de corrosão é intensificado.

Tabela 5.33 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para corrosão.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto Maduro	Cobertura Arenosa	S. R. Basalto Jovem	S. R. Arenitos
Depósitos Aluvionares	1/1	1/3	1/5	1/9	1/7
S. R. Basalto Maduro	3/1	1/1	1/2	1/3	1/4
Cobertura Arenosa	5/1	2/1	1/1	1/3	1/3
S. R. Basalto Jovem	9/1	3/1	3/1	1/1	2/1
S. R. Arenitos	8/1	3/1	3/1	1/1	1/1
SOMA	26,00	9,33	7,70	2,78	3,73

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto Maduro	Cobertura Arenosa	S. R. Basalto Jovem	S. R. Arenitos	AUTOVETOR
Depósitos Aluvionares	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04
S. R. Basalto Maduro	0,12	0,11	0,06	0,12	0,07	0,09
Cobertura Arenosa	0,19	0,21	0,13	0,12	0,09	0,15
S. R. Basalto Jovem	0,35	0,32	0,39	0,36	0,54	0,39
S. R. Arenitos	0,31	0,32	0,39	0,36	0,27	0,33

ANÁLISE DE ERRO	
λ_{máx}	5,28
IC	0,07
ICR	1,12
RC	0,06

6,15%

Em profundidades entre 1,5 – 5m ainda é possível que oscilações do N. A. atinjam o oleoduto e contribuam para a corrosão, porém com menor intensidade. Já em profundidades superiores a 5m, dificilmente o duto será alcançado por variações e não haverá contribuição para o processo de corrosão.

Como resultado a classe de distância inferior a 20m apresentou peso de 68%, seguida pelo intervalo entre 20 e 100m, com 24%. Distâncias superiores a 100m receberam apenas 8% de peso.

De fato, considerando a estimativa realizada, é na classe de distância inferior a 20m que haverá maior chance de haver nível d'água raso o suficiente para oscilar sobre o oleoduto. Observando-se também a razão de consistência, verifica-se que os julgamentos foram consistentes, com erro de apenas 0,1%.

A partir dos pesos obtidos gerou-se o mapa de suscetibilidade à corrosão, do qual é apresentado um recorte na Figura 5.26. A distribuição em área também foi contabilizada e é apresentada na Tabela 5.35.

Tabela 5.34 – Matriz AHP das classes de distância de drenagem perene para corrosão.

MATRIZ RECÍPROCA				
Distância Drenagem Perene	< 20m	20 - 100m	> 100m	
< 20m	1/1	3/1	8/1	
20 - 100m	1/3	1/1	3/1	
> 100m	1/8	1/3	1/1	
SOMA	1,46	4,33	12,00	

MATRIZ NORMALIZADA				
Distância Drenagem Perene	< 20m	20 - 100m	> 100m	AUTOVETOR
< 20m	0,69	0,69	0,67	0,68
20 - 100m	0,23	0,23	0,25	0,24
> 100m	0,09	0,08	0,08	0,08

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\text{máx}}$	3,00
IC	0,00
ICR	0,58
RC	0,00 0,10%

Figura 5.26 – Mapa de susceptibilidade à corrosão.

Tabela 5.35 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade à corrosão.

Suscetibilidade à corrosão	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	146560	0,2
Baixa	55500944	66,2
Média	26131824	31,1
Alta	1898672	2,3
Muito Alta	183072	0,2

As classes predominantes na área de estudo são com suscetibilidade baixa e média à corrosão, que juntas somam mais de 97%. As classes extremas (muito baixa e muito alta) praticamente não ocorrem na área, com apenas de 0,2% cada. A classe alta ainda que ocorra muito pouco, se distribui por, aproximadamente, 2% da área.

Os valores mais elevados registrados se concentram nas proximidades das drenagens inseridas nas unidades de arenito Botucatu e Intertrapiano, Basalto Jovem ou coberturas arenosas. O fato da classe de distância de drenagem perene predominante ser superior a 100m influenciou diretamente no resultado, mesmo tendo esse atributo apenas 20% de peso.

Em relação ao traçado do oleoduto, este percorre em sua maioria áreas com baixa suscetibilidade à corrosão. Na região em que atravessa o solo residual de arenito Botucatu, apresenta suscetibilidade média e em apenas um trecho, de solo residual de Basalto Jovem, apresenta suscetibilidade alta.

Não foi realizado nenhum levantamento que apontasse indícios de corrosão ao longo do oleoduto, a fim de validar o resultado obtido. Além disso, existem medidas anti-corrosão adotadas, que poderiam impedir que o processo corrosivo se desenvolvesse.

Porém, o mapa gerado se mostra condizente com os atributos de entrada. E a aplicação do método garantiu que as classes consideradas de maior importância se destacassem no mapa gerado.

5.6.5. Mapa de Suscetibilidade ao Colapso

O processo de colapsividade também foi considerado de importância para a área de estudo. Para elaborar o mapa de suscetibilidade ao colapso foram utilizados os mesmos atributos que os do mapa de suscetibilidade à corrosão. Contudo, a divisão das classes de atributo foi realizada de forma diferente, como mostrado na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Atributos e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade ao colapso.

Neste caso, o parâmetro observado para agrupar os tipos de solo foi o índice de vazios. E a distância das drenagens perenes, refletindo o N. A. foi dividida em quatro classes correspondentes a níveis raso, médio, profundo e muito profundo, em relação ao oleoduto.

Assim como os atributos utilizados para a geração do mapa de suscetibilidade à corrosão, para este mapa foram apenas dois. Portanto, os pesos dos mesmos foram definidos sem utilização do método AHP. Definiu-se 70% de peso para tipo de solo e 30% para nível de água, pois o tipo de solo é o principal condicionante para o colapso.

A primeira aplicação da matriz AHP foi feita para as classes de tipo de solo, mostrada na Tabela 5.36. Como citado anteriormente, os julgamentos foram pautados, principalmente, pelos valores de índice de vazios obtidos nos ensaios. Portanto, as coberturas arenosas foram consideradas com maior importância.

Como não foi possível obter o índice de vazios para o solo residual de Basalto Jovem, ele foi agrupado ao de Basalto Maduro, por apresentar outras características semelhantes (como massa específica e classificação textural). Essa unidade, apesar de apresentar valor de índice de vazios médio, foi julgada com o menor potencial para colapso, pois esses vazios são pequenos e não levam a uma boa condição de eluviação do solo.

Os depósitos aluvionares foram considerados com baixo potencial de colapso, por estarem associados aos cursos d'água, estando próximo da condição saturada. Já os solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano foram julgados com potencial mediano ao colapso.

O resultado obtido foi que as coberturas arenosas receberam peso de 49%, seguidas pelos solos residuais de arenito Botucatu e Intertrapiano (21%, cada), depósitos aluvionares com 5% e o menor peso foi atribuído aos solos residuais de Basalto, com 4%. A razão de consistência também foi baixa (3,59%).

Tabela 5.36 – Matriz AHP das classes de tipo de solo para colapso.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto Jovem/Maduro	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertrapiano
Depósitos Aluvionares	1/1	2/1	1/8	1/5	1/5
S. R. Basalto Jovem/Maduro	1/2	1/1	1/9	1/6	1/6
Cobertura Arenosa	8/1	9/1	1/1	3/1	3/1
S. R. Arenito Botucatu	5/1	6/1	1/3	1/1	1/1
S. R. Arenito Intertrapiano	5/1	6/1	1/3	1/1	1/1
SOMA	19,50	24,00	1,90	5,37	5,37

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto Jovem/Maduro	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertrapiano	AUTOVETOR
Depósitos Aluvionares	0,05	0,08	0,07	0,04	0,04	0,05
S. R. Basalto Jovem/Maduro	0,03	0,04	0,06	0,03	0,03	0,04
Cobertura Arenosa	0,41	0,38	0,53	0,56	0,56	0,49
S. R. Arenito Botucatu	0,26	0,25	0,18	0,19	0,19	0,21
S. R. Arenito Intertrapiano	0,26	0,25	0,18	0,19	0,19	0,21

ANÁLISE DE ERRO	
$\lambda_{\max}$	5,16
IC	0,04
ICR	1,12
RC	0,04
	3,59%

A ponderação das classes de distância de drenagem perene é mostrada na Tabela 5.37. A lógica utilizada nos julgamentos foi inversa à utilizada para o mapa de suscetibilidade à corrosão. Ou seja, quanto mais profundo fosse o nível, maior seria o potencial de colapsividade. Isso se justifica, pois para que o colapso ocorra são necessárias condições não saturadas, com N. A. profundo e intensa eluviação.

Como resultado, os pesos obtidos foram: 49% para distâncias superiores a 500m; 29% para distâncias entre 100 e 500m; 15% para distâncias entre 20 e 100m; e 7% para distâncias inferiores a 20m. Os julgamentos podem ser considerados coerentes, pois a razão de consistência foi inferior a 10% (0,7%).

A partir dos pesos, os dois mapas básicos em questão foram combinados para obtenção do mapa de suscetibilidade ao colapso. Os dados de distribuição de área de cada classe são apresentados na Tabela 5.38. Um recorte do mapa também é mostrado na Figura 5.28.

As classes predominantes são de média e alta suscetibilidade, ocupando juntas cerca de 72% da área. As classes muito baixa e baixa representam juntas cerca de 25% e a classe muito alta ocupa apenas 2,6% do total.

Tabela 5.37 – Matriz AHP das classes de distância de drenagem perene para colapso.

MATRIZ RECÍPROCA					
Distância Drenagem Perene	< 20m	20 - 100m	100 - 500m	> 500m	
< 20m	1/1	1/2	1/5	1/7	
20 - 100m	2/1	1/1	1/2	1/3	
100 - 500m	5/1	2/1	1/1	1/2	
> 500m	7/1	3/1	2/1	1/1	
SOMA	15,00	6,50	3,70	1,98	

MATRIZ NORMALIZADA					
Distância Drenagem Perene	< 20m	20 - 100m	100 - 500m	> 500m	AUTOVETOR
< 20m	0,07	0,08	0,05	0,07	0,07
20 - 100m	0,13	0,15	0,14	0,17	0,15
100 - 500m	0,33	0,31	0,27	0,25	0,29
> 500m	0,47	0,46	0,54	0,51	0,49

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\text{máx}}$	4,03	
IC	0,01	
ICR	0,90	
RC	0,01	0,70%

A ocorrência das classes muito baixa e baixa se restringe aos arredores dos cursos d'água e sobre os solos residuais de Basalto, pois essa representa a combinação dos dois fatores de menor peso. A classe de suscetibilidade muito alta se restringiu às coberturas arenosas e o resto da área apresentou suscetibilidade média e alta.

Não foi possível verificar em campo a ocorrência do processo de colapso. Porém, os resultados evidenciam, mais uma vez, que o método proposto garante que os atributos selecionados sejam traduzidos no mapa final com a importância (peso) a eles atribuída.

Dessa forma, se o mapa gerado não estivesse fiel à realidade, o mesmo poderia ser corrigido com a alteração dos julgamentos realizados. Ou ainda com a seleção de mais atributos representativos para o fenômeno na área de estudo.

Tabela 5.38 – Distribuição em área das classes do mapa de suscetibilidade ao colapso.

Suscetibilidade à colapsividade	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	4246384	5,1
Baixa	16869328	20,1
Média	34966368	41,7
Alta	25590720	30,5
Muito Alta	2188272	2,6

Figura 5.28 – Mapa de suscetibilidade ao colapso.

5.6.6. Mapa de Suscetibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos

Esse mapa, conforme descrito no método, representa os danos potenciais aos elementos bióticos e socioeconômicos existentes na área. As classes de atributos para geração deste mapa foram definidas a partir do mapa de uso e ocupação. A divisão das classes é mostrada na Figura 5.29.

Essas classes foram selecionadas visando traduzir a importância dos elementos naturais existentes, bem como da ocupação antrópica e suas atividades desenvolvidas. Por isso, as classes de uso foram divididas separando áreas naturais existentes, legalmente protegidas, áreas de ocupação humana e também as áreas onde são desenvolvidas atividades econômicas.

Para obtenção dos pesos a matriz AHP foi aplicada apenas uma vez, pois só havia um atributo a ser analisado. Portanto, as classes de uso e ocupação foram julgadas conforme mostrado na Tabela 5.39.

As áreas de preservação permanente (de cursos d'água) foram consideradas as mais importantes, pois além de serem áreas legalmente protegidas, normalmente conservam fragmentos de mata nativa. As áreas de mata e também as ocupações humanas foram consideradas com elevada importância, pois uma abriga elementos da fauna e flora, enquanto na outra se encontram elementos socioeconômicos.

As áreas de solo exposto, campo sujo e pastagem foram consideradas as menos importantes, pois se considerou que não possuem valor econômico considerável, nem abrigam elementos representativos de fauna e flora. Os usos que estão associados direta ou indiretamente às atividades econômicas foram considerados de importância moderada na geração do mapa.

Figura 5.29 – Atributo e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

Tabela 5.39 – Matriz AHP das classes de uso e ocupação para os fatores bióticos e socioeconômicos.

MATRIZ RECÍPROCA						
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas/ Reflorestamento/ Estradas/ LT/ Ind.	Área Urbana/Loteamento/ Prop. Rurais	Solo Exposto/ Campo sujo/ Pastagem	
APP	1/1	3/1	5/1	2/1	9/1	
Mata	1/3	1/1	3/1	1/2	6/1	
Culturas/ Reflorestamento/ Estradas/ LT/ Ind.	1/5	1/3	1/1	1/3	5/1	
Área Urbana/Loteamento/ Prop. Rurais	1/2	2/1	3/1	1/1	7/1	
Solo Exposto/ Campo sujo/ Pastagem	1/9	1/6	1/5	1/7	1/1	
SOMA	2,14	6,50	12,20	3,98	28,00	

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas / Reflorestamento / Estradas / LT / Ind.	Área Urbana/Loteamento / Prop. Rurais	Solo Exposto / Campo sujo / Pastagem	AUTOVETOR
APP	0,47	0,46	0,41	0,50	0,32	0,43
Mata	0,16	0,15	0,25	0,13	0,21	0,18
Culturas / Reflorestamento / Estradas / LT / Ind.	0,09	0,05	0,08	0,08	0,18	0,10
Área Urbana/Loteamento / Prop. Rurais	0,23	0,31	0,25	0,25	0,25	0,26
Solo Exposto / Campo sujo / Pastagem	0,05	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\max}$	5,24	
IC	0,06	
ICR	1,12	
RC	0,05	5,25%

A ordem de prioridades obtida para as classes de uso e ocupação foi: Áreas de Preservação Permanente (43%), seguido por área urbana, loteamento e propriedades rurais (26%), mata (18%), culturas, reflorestamento, vias, linhas de transmissão e indústrias (10%) e, por último, solo exposto, campo sujo e pastagem (3%). Os julgamentos que levaram a esses pesos podem ser considerados consistentes, já que o erro associado foi de 5,25%.

Esses são os pesos utilizados para gerar o mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos. Um recorte do mapa gerado é apresentado na Figura 5.30. O mapa também teve as áreas de suas classes sumarizadas, que são apresentadas na Tabela 5.40.

Figura 5.30 – Mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

Tabela 5.40 – Distribuição em área das classes do mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

Suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	7852432	9,4
Baixa	66971616	79,8
Média	2957824	3,5
Alta	4078352	4,9
Muito Alta	2030048	2,4

A classe predominante foi a de suscetibilidade baixa, com 79,8%. A classe muito baixa se distribuiu por 9,4% da área. A classe de suscetibilidade média ocupou 3,5% e as classes alta e muito alta ocuparam juntas 7,3% do total.

A ocorrência da classe muito alta foi a menor, pois está restrita às APPs, que recebeu maior peso. Como foram consideradas apenas as APPs de drenagens, e existiam poucas na área de estudo, esse resultado era esperado.

Como o uso predominante é de plantações de cana de açúcar (72% da área), e esta classe recebeu peso baixo, a predominância de suscetibilidade baixa é justificada. As áreas de suscetibilidade alta estão associadas às ocupações humanas e atividades socioeconômicas desenvolvidas.

Novamente, o resultado obtido evidencia como o método permite traduzir os atributos e suas importâncias relativas no mapa final gerado. Contudo, a análise realizada na geração deste mapa foi muito simplificada, o que pode ser justificado pela área de concentração da pesquisa ser a geotecnia.

Seria necessária uma equipe multidisciplinar para ser possível avaliar de forma adequada a suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos. Já que esta suscetibilidade é a mais complexa e subjetiva de ser avaliada, dentre as estudadas neste trabalho.

Porém, deixar de produzir este mapa, ainda que de forma simplificada, faria com que a aplicação do método desviasse do conceito proposto, pois seria incoerente gerar um mapa de fragilidade ambiental considerando apenas aspectos do meio físico. Sempre que possível os aspectos do meio biótico e socioeconômico deverão ser analisados detalhadamente.

5.6.7. Mapa de Suscetibilidade a Chuvas Intensas

O mapa de suscetibilidade a chuvas intensas é de grande importância, pois é o principal agente deflagrador da maioria dos processos estudados neste trabalho. Como citado no método, para elaboração deste mapa foi utilizado como atributo apenas o valor de chuva acumulada no período chuvoso. Sendo traduzido pela elaboração de um mapa no qual os valores de precipitação registrados nos meses mais chuvosos foram interpolados.

A divisão das classes do atributo buscou agrupar as quebras naturais dentro dos dados obtidos. Portanto, a classificação foi feita pela função *Natural Breaks* do programa ArcMap 9.3. O resultado dessa divisão pode ser visualizado na Figura 5.31.

Assim como para o mapa anterior, a ponderação em matriz AHP foi realizada apenas uma vez, neste caso julgando os intervalos de precipitação. A matriz pode ser visualizada na Tabela 5.41. Buscou-se considerar nos julgamentos quanto maior fosse o valor de precipitação, maior seria o potencial para chuvas intensas. Além disso, considerou-se um aumento de importância proporcional ao aumento dos valores de cada classe.

Dessa forma, a ordem de prioridades resultante foi: precipitações inferiores a 201,5mm (4%), entre 201,5 e 210,1mm (10%), entre 210,1 e 216,4mm (16%), entre 216,4 e 222,4mm (27%) e superiores a 222,4mm (43%).

A pequena variação de pesos entre as classes intermediárias pode ser justificada, pois não há muita variação nos valores dessas classes. A análise da consistência dos julgamentos resultou em valor de erro aceitável (1,58%), inferior aos 10% limites.

Figura 5.31 – Atributo e suas respectivas classes definidos para elaboração do mapa de suscetibilidade a chuvas intensas.

Tabela 5.41 – Matriz AHP para das classes de precipitação.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Chuvas Acumuladas	< 201,5 mm	201,5 - 210,1 mm	210,1 - 216,4 mm	216,4 - 222,4 mm	> 222,4 mm
< 201,5 mm	1/1	1/3	1/5	1/7	1/9
201,5 - 210,1 mm	3/1	1/1	1/2	1/3	1/4
210,1 - 216,4 mm	5/1	2/1	1/1	1/2	1/3
216,4 - 222,4 mm	7/1	3/1	2/1	1/1	1/2
> 222,4 mm	9/1	4/1	3/1	2/1	1/1
SOMA	25,00	10,33	6,70	3,98	2,19

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Chuvas Acumuladas	< 201,5 mm	201,5 - 210,1 mm	210,1 - 216,4 mm	216,4 - 222,4 mm	> 222,4 mm	AUTOVETOR
< 201,5 mm	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04
201,5 - 210,1 mm	0,12	0,10	0,07	0,08	0,11	0,10
210,1 - 216,4 mm	0,20	0,19	0,15	0,13	0,15	0,16
216,4 - 222,4 mm	0,28	0,29	0,30	0,25	0,23	0,27
> 222,4 mm	0,36	0,39	0,45	0,50	0,46	0,43

ANÁLISE DE ERRO		
$\lambda_{\text{máx}}$	5,07	
IC	0,02	
ICR	1,12	
RC	0,02	1,58%

Esses pesos foram os valores de entrada para geração do mapa de suscetibilidade a chuvas intensas. As áreas ocupadas por cada classe foram sumarizadas e são apresentadas na Tabela 5.42. Para este mapa, o recorte que vinha sendo apresentado não foi representativo, pois as classes do mapa ocupam grandes áreas de forma que se o recorte fosse apresentado seria possível visualizar apenas uma classe.

Observando a Tabela 5.42, percebe-se que há uma distribuição em área relativamente equitativa das classes, com a classe média se destacando um pouco em relação às outras (33,6%). Essa distribuição de áreas seguiu a do mapa de chuvas intensas médias, o que era esperado já que o mapa de suscetibilidade foi gerado a partir apenas desse plano de informação.

Tabela 5.42 – Distribuição em área das classes de suscetibilidade a chuvas intensas.

Suscetibilidade a chuvas intensas	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	7837808	9,3
Baixa	14624816	17,4
Média	28224368	33,6
Alta	20129280	24,0
Muito Alta	13160608	15,7

5.7. Mapa de Fragilidade Ambiental

A partir dos sete mapas de suscetibilidade intermediários gerados, foi possível gerar o mapa de fragilidade ambiental conforme descrito no método. Na escala final de impressão (1:25.000), o resultado apresentou classes com áreas muito pequenas e pouco representativas.

Visando compatibilizar a dimensão das áreas apresentadas com a escala utilizada e tornar a aplicação do resultado mais prática, foi realizada uma simplificação cartográfica. Essa simplificação foi feita através da aplicação de um filtro considerando o critério de áreas significativas na escala adotada. Ou seja, áreas menores que um determinado valor foram consideradas pouco representativas.

Logo, a aplicação do filtro selecionou áreas menores a 10.000m² (que representam áreas inferiores a 16mm², na escala do mapa impresso). As áreas selecionadas foram então agrupadas aos polígonos vizinhos de maior fronteira, assumindo a classe do mesmo.

Para controlar as alterações que a simplificação gerou as áreas de cada classe antes e depois da aplicação do filtro foram sumarizadas e são apresentadas na Tabela 5.43. Além disso, um recorte do mapa comparando o resultado com e sem o filtro é apresentado na Figura 5.32.

Observa-se que não ocorreram alterações muito significativas na distribuição de áreas, sendo que as duas classes menos críticas aumentaram sensivelmente, enquanto as outras apresentaram pequena redução. Quanto às duas classes mais críticas, não seria interessante que apresentassem considerável redução, pois estariam sendo eliminadas áreas importantes para a gestão ambiental e geotécnica.

Tabela 5.43 – Distribuição em área das classes de fragilidade ambiental com e sem refinamento.

Fragilidade Ambiental	Sem Filtro		Com Filtro	
	Área (m²)	% da Área Total	Área (m²)	% da Área Total
Muito Baixa	25266800	30,1	26892032	32,1
Baixa	20276672	24,2	20375616	24,3
Média	20230064	24,1	20062896	23,9
Alta	12278288	14,7	11015296	13,2
Muito Alta	5771776	6,9	5477776	6,5

Figura 5.32 – Mapa de fragilidade ambiental comparando o resultado com a aplicação do filtro.

Contudo, verificou-se que as classes alta e muito alta reduziram em apenas 0,1% e 0,06%, respectivamente. Portanto, pode-se considerar que a variação apresentada foi desprezível e não afetará a qualidade das análises realizadas. Além disso, a ordem de predominância de cada classe não foi alterada.

Observando os recortes apresentados na Figura 5.32, pode-se concluir que o resultado com simplificação cartográfica apresenta áreas mais representativas na escala. Isso torna sua aplicação prática mais viável. Como foi demonstrado que a distribuição de cada classe praticamente não foi alterada, o mapa simplificado será utilizado para discussão dos resultados.

Para isso, o mapa de fragilidade ambiental (com filtro) para a área inteira é apresentado no APÊNDICE B. No mapa também estão presentes as bacias delimitadas, a fim de permitir uma discussão dos resultados por bacia. A distribuição de áreas por bacia também é apresentada, na Tabela 5.44.

Tabela 5.44 – Distribuição em área de bacias para as classes de fragilidade ambiental.

Fragilidade Ambiental										
Bacia	Muito Baixa		Baixa		Média		Alta		Muito Alta	
	Área (m²)	% da Área Total	Área (m²)	% da Área Total	Área (m²)	% da Área Total	Área (m²)	% da Área Total	Área (m²)	% da Área Total
1	1159760	19,5	1744704	29,3	1533520	25,8	561072	9,4	952976	16,0
2	5479056	49,2	4101840	36,8	357056	3,2	721856	6,5	477008	4,3
3	599424	81,5	94416	12,8	21760	3,0	19504	2,7	0	0,0
4	2393984	94,5	11248	0,4	94448	3,7	34784	1,4	0	0,0
5	2909680	30,4	3170976	33,2	1943616	20,3	1041072	10,9	497648	5,2
6	3284304	70,8	795856	17,2	134000	2,9	245536	5,3	177152	3,8
7	106560	10,8	633184	64,2	161392	16,4	85312	8,6	0	0,0
8	88208	5,1	420848	24,6	800656	46,8	368032	21,5	34528	2,0
9	4637296	18,3	3509328	13,8	8398432	33,1	5780112	22,8	3041232	12,0
10	380816	53,4	222448	31,2	27248	3,8	39680	5,6	43168	6,0
11	221904	70,7	72336	23,0	0	0,0	0	0,0	19632	6,3
12	897216	100,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
13	3942800	23,5	5529616	32,9	6050784	36,0	1066816	6,3	221520	1,3
14	250208	93,9	16240	6,1	0	0,0	0	0,0	0	0,0
15	540880	24,6	52576	2,4	539984	24,6	1051520	47,8	12912	0,6

Em termos gerais, a classe de fragilidade ambiental predominante foi a muito baixa, ocupando 32,1%. Em seguida, as classes baixa e média, ocuparam praticamente a mesma porcentagem de área, com 24,3% e 23,9%, respectivamente. A classe alta ainda ocupou parte significativa da área, com quase 13,2% e a muito alta apenas 6,5%.

Considerando as bacias, na maioria delas predominam as classes baixa e muito baixa. Em especial, nas bacias de número 3, 4, 11, 12 e 14 essas duas classes juntas somam mais de 90% em área. Portanto, elas podem ser consideradas como as menos críticas e, a princípio, nenhuma medida de gestão ambiental e geotécnica precisaria ser adotada.

Já as bacias de número 1, 8 e 13 foram consideradas com fragilidade ambiental intermediária, pois apresentam mais de 25% em área ocupada pela classe média. A bacia 9, apesar de também apresentar mais de 25%, não foi considerada neste grupo por ser ocupada, em áreas significativas, pelas classes mais críticas. Nessas bacias podem ser adotadas medidas de caráter preventivo.

A distribuição percentual em área da classe de fragilidade ambiental muito alta é relativamente baixa em todas as bacias. Portanto, as bacias mais críticas foram analisadas pela soma das classes alta e muito alta. Dessa forma, merecem destaque as bacias de número 9 e 15, que apresentaram 34,8 e 48,4%, respectivamente, da área ocupada por essas classes.

São essas as bacias que merecem maior atenção para uma adequada gestão ambiental e geotécnica, e as ações a serem adotadas devem priorizá-las. As demais bacias que não foram citadas foram consideradas pouco críticas. A Figura 5.33 mostra de forma simplificada e esquemática o agrupamento de bacias acima descrito. O resultado detalhado pode ser visualizado no APÊNDICE B.

Considerando a adequação dos resultados obtidos ao conceito adotado na pesquisa, o mapa de fragilidade ambiental combina os diferentes processos que podem ocorrer aos elementos bióticos e socioeconômicos afetados. Com isso, ele representa as áreas que podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente devido aos fatores intrínsecos. Este resultado é justamente o esperado, pois traduz fielmente a definição adotada.

Cabe ainda destacar que se os processos considerados tivessem sido estudados de forma mais profunda, ou ainda, se estivessem envolvidos na elaboração dos mapas intermediários profissionais de outras áreas, o resultado final poderia ser diferente. Outros mapas intermediários poderiam ser julgados necessários, ou algum utilizado poderia ser descartado.

Figura 5.33 – Agrupamento esquemático das bacias.

5.8. Aplicação do Mapa de Fragilidade Ambiental no Oleoduto

O mapa de fragilidade ambiental (APÊNDICE B) foi utilizado de maneira qualitativa para avaliar os potenciais impactos ambientais, que poderiam resultar do oleoduto existente. O mapa poderia ainda ser utilizado para determinar o melhor traçado, caso o empreendimento ainda não estivesse implantado.

Entre as estacas 176,3 e 172,3, dentro da bacia 2, o oleoduto percorre áreas predominantemente de fragilidade ambiental muito baixa e baixa. Apenas em um trecho muito pequeno, de aproximadamente 150m, atravessa uma zona de alta fragilidade ambiental. Contudo, essa região situa-se justamente na travessia de uma drenagem perene e, portanto, seria interessante que alguma medida pontual fosse adotada para evitar a contaminação da mesma, no caso de um vazamento.

Entre as estacas 172,3 e 171,8, na bacia 4, o oleoduto atravessa apenas áreas de fragilidade ambiental muito baixa. Além disso, o duto está a mais de 1km distante da zona de fragilidade média e alta mais próxima. Portanto, dentre as bacias percorridas pelo duto, esta é a menos crítica e, no caso de um possível vazamento de óleo, os impactos gerados seriam menores. Portanto, nenhuma medida imediata precisaria ser adotada.

Da estaca 171,8 a 169,3, dentro da bacia 6, o oleoduto também cruza somente áreas de fragilidade ambiental muito baixa. Contudo, há uma cabeceira de drenagem a 300m a jusante do mesmo, que pode ser contaminada caso ocorra um acidente. Neste caso, seria interessante que se adotassem medidas de monitoramento.

Na bacia 5, entre as estacas 169,3 e 166,8, são atravessadas todas as classes de fragilidade ambiental, com exceção da muito alta. Em extensão, a classe mais percorrida é a intermediária. Por isso, nesta bacia poderiam ser adotadas medidas preventivas e de monitoramento.

Entre as estacas 166,8 e 161,3, na bacia 9, o duto encontra-se principalmente sobre áreas de fragilidade ambiental alta e muito alta. Portanto, esta é a bacia mais crítica para o empreendimento e medidas de segurança devem ser adotadas prioritariamente nesta bacia. Dessa forma, impactos ambientais poderiam ser impedidos ou minimizados.

Além disso, se o mapa de fragilidade ambiental tivesse sido gerado previamente à implantação do duto, com um deslocamento de aproximadamente 800m a sudoeste (em direção à via) as áreas de classe alta e muito alta atravessadas seriam minimizadas. O oleoduto passaria a atravessar áreas de fragilidade média, baixa e muito baixa.

Vale ressaltar que considerando o aspecto ambiental de vazamento de óleo nessa região, os impactos ambientais decorrentes seriam agravados pelo fato da unidade de material inconsolidado nesse trecho ser solo residual de arenito Botucatu. Essa unidade favoreceria a rápida migração dos contaminantes, possibilitando que as águas subterrâneas sejam contaminadas mais rapidamente.

No trecho inicial do duto, entre as estacas 161,3 e 157,8, na bacia 13, são percorridas todas as classes de fragilidade ambiental, com predomínio da classe intermediária. Neste caso, seria interessante adotar medidas preventivas, especialmente nas zonas mais críticas.

6. CONCLUSÕES

Em relação à definição do conceito de fragilidade ambiental, concluiu-se que existem duas principais abordagens. Ambas consideram que a fragilidade ambiental de um sistema representa a desestabilização do equilíbrio dinâmico, existente entre os processos e os elementos componentes do meio. A diferença entre as abordagens é que uma linha considera que a desestabilização é causada por fatores internos e externos, e a outra considera apenas fatores internos.

O presente trabalho adotou como definição aquela que considera a fragilidade como uma característica intrínseca do meio ambiente, ou seja, causada por fatores internos. Os usos e ocupações consolidados no momento em que o estudo é realizado foram considerados internos ao sistema. A influência de fatores externos, normalmente antrópicos, foi relacionada aos possíveis impactos ambientais decorrentes.

Quanto ao método, acredita-se ser importante considerar todos os aspectos internos ao meio ambiente para avaliar os níveis de fragilidade ambiental, sejam eles do meio físico, biótico e socioeconômico. Esses aspectos são traduzidos, no método proposto, pelos mapas de suscetibilidade intermediários.

Além disso, defende-se a importância de utilizar métodos que possibilitem reduzir a subjetividade das análises, característica sempre presente em estudos ambientais. Nesse sentido, o método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) se mostra bastante eficiente, pois garante a consistência das ponderações realizadas pelo profissional.

Os mapas intermediários gerados puderam ser validados, alguns com levantamentos de campo (erosão, por exemplo), outros apenas com uma análise visual, permitindo considerar os mapas representativos dos processos estudados. Esta etapa foi importante, pois esses mapas são os dados de entrada para geração do mapa de fragilidade ambiental, garantindo sua qualidade.

A partir dessa validação pôde-se concluir que o método proposto é adequado para a geração deste tipo de mapa. Também foi possível concluir que os atributos (e suas classes) utilizados na geração dos mapas de suscetibilidade intermediários foram representativos. E que a qualidade das ponderações realizadas foi garantida, todas apresentando razão de consistência inferior aos 10% limites.

Concluiu-se também que a área de estudo apresenta, predominantemente, áreas de fragilidade ambiental muito baixa, ocupando cerca de 32%. As classes mais críticas ocupam juntas 20% da área. As bacias hidrográficas mais críticas são as de número 9 e 15, pois mais

de 30% de suas áreas são ocupadas pelas classes mais críticas. Em relação ao oleoduto, o setor com maior fragilidade ambiental é o situado entre as estacas 163,3 e 165,8 dentro da bacia 9.

O mapa gerado tem potencial para ser utilizado previamente à implantação de um empreendimento, no caso do oleoduto, definindo o melhor traçado. Pode ainda ser utilizado para auxiliar a gestão ambiental e geotécnica pós-implantação, permitindo prever a instalação de dispositivos de segurança, para evitar ou minimizar impactos ambientais.

Verificou-se também que o mapa de fragilidade ambiental gerado se mostrou adequado ao conceito adotado na pesquisa. Na medida em que combina os diferentes processos do meio físico que podem ocorrer aos elementos bióticos e socioeconômicos afetados, ele representa as áreas que podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente devido aos fatores intrínsecos.

O método de geração do mapa de fragilidade ambiental pode ser comparado a outros existentes como listas de verificação (*checklists*), matrizes de impactos, por exemplo. Dentre as vantagens do método proposto podem ser citadas a utilização da técnica AHP, que reduz a subjetividade das análises e a flexibilidade do procedimento, por permitir que seja realizada uma análise dos processos com maior ou menor detalhamento, em função do escopo do estudo.

Como prosseguimento da pesquisa, pode ser sugerido que os processos e elementos sejam analisados mais detalhadamente (especialmente os bióticos e socioeconômicos), buscando utilizar mais atributos quantitativos obtidos a partir de investigações e análises de laboratório. Mais processos poderiam ainda ser considerados. Com isso seria possível gerar um mapa de fragilidade ambiental mais rico em detalhes.

Além disso, poderiam ser analisados aspectos da área de estudo relacionados a vazamentos em oleodutos, possibilitando cruzar essas informações com o mapa de fragilidade ambiental obtido. Dessa forma, seria possível gerar o mapa de impactos ambientais a vazamentos de óleo para área de estudo. Esse resultado teria uma aplicação mais direta e prática para a gestão geotécnica e ambiental do empreendimento.

REFERÊNCIAS¹

- Almeida CN. **Modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um sistema de informações geográficas [Tese]**. São Carlos (SP). Universidade de São Paulo, Instituto de Hidráulica e Saneamento; 2006.
- Alonso UR, Pannoni FB. **Corrosão em estacas metálicas: propostas para a revisão da norma NBR6122/96**. Solos e Rochas, vol.9, nº 1. São Paulo (SP). 2006. Pp. 115 – 117.
- Alves VRFM. **Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária usando algoritmo genético [Dissertação]**. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ). 2007.
- Andersen LJ, Gosk J. **Applicability of vulnerability maps**. TNO Committee for Hydrological Research: Proceeding and Information. The Netherlands. Vol. 38. 1987. pp. 321- 332.
- Art HW. **Dicionário de Ecologia e Ciências Ambientais**. 2. ed. São Paulo: Melhoramentos. 2001.
- Associação de Normas Técnicas – ABNT. **Solo – Análise Granulométrica (NBR 7181)**. Rio de Janeiro, 1984a. 13 p.
- Associação de Normas Técnicas – ABNT. **Determinação da massa específica (NBR 6508)**. Rio de Janeiro, 1984b. 8 p.
- Augusto Filho O. **Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle**. In: Bitar OU. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo (SP). 1995. Cap. 3. pp. 77 – 100.
- Augusto Filho O. **Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para implantação de seguros em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP)**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2001. 196p.
- Augusto Filho O. **Sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG: aplicação no Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA) entre São Simão e Ribeirão Preto (SP)**. Relatório Científico Final. Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia. São Carlos (SP). 2008.
- Augusto Filho O, Hirai JN, Oliveira AS, Liotti ES. **GIS applied to geotechnical and environmental risk management in a Brazilian oil pipeline**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Print), Vol. 69. 2010. pp. 631-641.
- Bana e Costa C, Vansnick JC. **MACBETH – Na interactive path toward the construction of cardinal Value Functions**. International Transactions in Operational Research. 1994. Vol. 1, nº 4, pp. 489-500.

¹De acordo com o estilo Vancouver.

- Bana e Costa CA. **Structuration, Construction et Explotation d'un Modèle Multicritère d'Aide à la Decision [Tese]**. Lisboa. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico; 2002.
- Bertoni JO, Lombardi Neto F. **Conservação do Solo**. Livroceres, Piracicaba (SP). 1985. 368 p.
- Câmara G, Davis C, Monteiro AM, D'alge JC. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE. 2001. (2a. edição, revista e ampliada).
- Carvalho DF, Silva LDB. **Precipitação**. In: Carvalho DF, Silva LDB. **Hidrologia. [Apostila]**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica (RJ). 2006. Cap. 4. pp. 33 – 59.
- Cerri LES, Amaral CP. **Riscos Geológicos**. In: Oliveira AMS, Brito SNA. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE); 1998. Cap. 18, pp. 301-310.
- Cintra JCA, Aoki N. **Projeto de Fundações em Solos Colapsíveis**. Serviço Gráfico da EESC-USP, São Carlos. 2009. 99 p.
- Coyle G. **The Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Practical Strategy. Open Access Material. Pearson Education Limited. 2004. [Local desconhecido].
- Crepani E, Medeiros JS, Azevedo LG, Duarte V, Hernandez P, Florenzano T. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos, INPE; 1996.
- Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa. Rio de Janeiro (RJ). Editora Nova Fronteira S/A. 1995. p. 687.
- Dodgson JS, Spackman M, Pearman A, Phillips LD. **Multi-criteria analysis: a manual**. Department for Communities and Local Government, London (UK); 2009.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10. Rio de Janeiro - RJ. 1979. 83p.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro (RJ). 2011. 230 p.
- Faria DGM. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do processo de análise hierárquica (AHP) [Tese]**. São Carlos (SP). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC); 2011.
- Felgueiras CA. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação**. São José dos Campos: INPE; 1999. 212p.
- Ferreira J. **Avaliação dos problemas ambientais relacionados aos aspectos geológico-geotécnicos e dutos enterrados, Polduto OSBRA: trecho Porto Ferreira - Ribeirão Preto. [Dissertação]**. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos (SP). 1999.

- Fierz MSM. **As abordagens sistêmicas e do equilíbrio dinâmico na análise da fragilidade ambiental do litoral do estado de São Paulo: contribuição à geomorfologia das planícies costeiras [Tese]**. São Paulo (SP). Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia; 2008.
- Garcez LN. **Hidrologia**. Edgard Blücher. São Paulo, 1967. 249 p.
- Goldsmith FB. **Evaluating nature**. In: Warren A. e Goldsmith F.B. (eds.). **Conservation in Perspective**. John Wiley and Sons, Chichester. 1983. pp. 233-246.
- Gonçalves RW. **Métodos multicritérios como apoio à decisão em comitês de Bacias Hidrográficas [Dissertação]**. Fortaleza (CE). Universidade de Fortaleza; 2001.
- Grochocki ACW. **Definição de um modelo espaço-temporal de redes de drenagem. [Dissertação]**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba (PR). 2008.
- Guan D, Hu B, Gao W. **Evaluation method of ecological environment vulnerability and its application**. 5º WSEAS. Conferência Internacional de Meio Ambiente, Ecossistemas e Desenvolvimento. Tenerife, Espanha. 2007.
- Hutchinson JN. **Mass Movement**. Encyclopedia of Geomorphology, New York. 1968.
- Hwang CL, Yoon K. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. Springer-Verlag, Berlin, Alemanha. 1981.
- Infanti Jr. N, Fornasari Filho N. **Processos de Dinâmica Superficial**. In: Oliveira AMS, Brito SNA. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE); 1998. Cap. 9, pp. 131 – 152.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo**. São Paulo (SP). 1986.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. **Programa Serra do Mar: Carta Geotécnica da Serra do Mar nas folhas Santos e Riacho Grande**. São Paulo: Relatório n. 26504, 1988.
- International Association of Engineering Geology – IAEG. **Engineering geological maps: guide to their preparation**. Earth Sciences, 15. Paris, UNESCO. 1976. 79 p.
- Jorge FN, Uehara K. **Águas de Superfície**. In: Oliveira AMS, Brito SNA. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE); 1998. Cap. 7, pp. 101 – 110.
- Klingebiel AA, Montgomery PH. **Land Capability Classification**. Soil Conservation Service, Washington. 1961.
- Lan TN. **Um nouvel essai d'identification des sols – l'essai au bleu de méthylène**. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº 88. França. 1977.
- Larousse Cultural. **Grande Enciclopédia**. Volume 11. Nova Cultural Ltda. 1998.

- Lepsch IF. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso.** Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Campinas (SP). 1983.
- Liang G, Wang M. **A Fuzzy Multi-criteria Decision Method for Facility Selection.** International Journal of Production Research, 1991. Vol. 29, n. 11, pp. 2313-1330.
- Liporaci SR, Zuquette LV, Souza MP. **Metodologia para Elaboração da Carta de Potencial de Escoamento Superficial e suas Aplicações em Estudos de Planejamento Ambiental.** In: IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa, COIMBRA. 1999.
- Loureiro A, Brasil S, Yokoyama L. **Estudo da corrosividade de solo contaminado por substâncias químicas através de ensaios de perda de massa e índice de Steinrath.** Corros. Prot. Mater., Vol. 26, nº4. 2007.
- Mathewson C, Font RG. **Geologic environment: forgotten aspects in the land use planning process.** The Geological Society of America - Engineering Geology Case Histories, 1974. 10:23-38.
- Musso MAL. **Transporte de Solutos em Barreiras de Material Argiloso Compactado (CCL) e Geocompostos Bentoníticos (GCL): Fluxos Diretos, Acoplados e Comportamento Membrana. [Tese].** Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos (SP). 2008.
- Nilsson C, Grelsson G. **The fragility of ecosystems: a review.** Journal of Applied Ecology, 1995. Vol. 32, pp. 677-692.
- Noernberg MA, Lana PC. **A sensibilidade de manguezais e marismas a impactos por óleo: fato ou mito? Uma ferramenta para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas costeiros a derrames de óleo.** In: Geografares, Vitória, nº 3. 2002.
- Nogueira JB. **Mecânica dos Solos – Ensaio de Laboratório.** São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 2005. 248p.
- Passarella SM, Machado FB, Riedel OS, Lopes ESS, Ferreira MV, Moreira MR, Azzi AA. **Análise da relação entre escorregamento e formas de vertentes no município de Cubatão (SP) e seus arredores.** Geociências, v. 27, n. 1. UNESP, São Paulo (SP). 2008. Pp. 7 – 20.
- Pecci A. **Geoinformatic Methodologies and Quantitative Tools for Detecting Hotspots and for Multicriteria Ranking and Prioritization: Application on Biodiversity Monitoring and Conservation [Tese].** Universidade de Estudos de Roma. Roma, Itália; 2009.
- Pejon OJ. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. [Tese].** Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos (SP). 1992. 224 p.
- Pereira LC. **Aptidão agrícola das terras e sensibilidade ambiental: uma proposta metodológica [Tese].** Campinas (SP). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2002. 135p.

- Pinto CS, Gabara W, Peres JEE, Nader JJ. **Propriedades dos solos residuais**. In: Solos do Interior de São Paulo. ABMS. São Paulo (SP). 1993. pp. 95-142.
- Porto RLL. **Curso de drenagem urbana**. In: Porto RLL, Martins JRS, Bonilha JR. **Drenagem urbana**. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Birigui (SP). 1992. Parte I. pp. 1.0 – 1.43.
- Ratcliffe DA. **Criteria for the selection of nature reserves**. Advancement of Sciences, 27. 1971. pp. 294-296.
- Ratcliffe DA. **A Nature Conservation Review**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1977.
- Rocha GC, Fernandes BJ. **Fragilidade geotécnica e riscos a escorregamentos na área urbana de Juiz de Fora, MG**. 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. Uberlândia (MG). 2007. pp. 51-65.
- Rodrigues VL. **Mapeamento geotécnico como base para o planejamento urbano e ambiental: Município de Jaú/SP. [Dissertação]**. São Carlos (SP). Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia. 2008.
- Rodríguez JR. **Caracterização geológica-geotécnica de solos argilosos para serem empregados como Barreiras Selantes e Sistemas de Cobertura – Vale do Ribeira [Dissertação]**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos (SP). 2013. No prelo.
- Ross JLS. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**. Revista do Departamento de Geografia. Nº 8. 1994. pp. 63-74.
- Rossi O. **Introduzione**. In: Rossi O. (Ed.), **Cartografia multiscalare della Natura**. Supergrafica. Parma, Itália. 2001. pp. 11-20.
- Rufino IAA, Falcao EC, Passos IDCF. **Formação Superior Em Geoprocessamento: O relato de uma experiência positiva no CEFET-PB**. GeoNordeste - 3º Simpósio Regional de Geoprocessamento de Sensoriamento Remoto. Aracaju (SE). Embrapa, Tabuleiros. 2006.
- Saaty TL. **A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures**. Journal of Mathematical Psychology, vol. 15. 1977. pp. 234-281.
- Saaty TL. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw Hill International. 1980.
- Saaty TL. **Decision Making With Dependence And Feedback: The Analytic Network Process**. RWS Publications. Pittsburgh (PA), EUA. 1996.
- Saaty TL. **Decision making with the analytic hierarchy process**. International Journal Services Sciences, vol. 1, Nº 1. 2008. pp. 83-98.
- Salomão FXT, Iwasa OU. **Erosão e a ocupação rural e urbana**. In: Bitar OU. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo (SP). 1995. Cap. 3. pp. 31 – 58.

- Salomon VAP, Montevechi JAB, Pamplona EO. **Justificativas para aplicação do método de análise hierárquica**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 19. Rio de Janeiro (RJ). Anais. Porto Alegre (RS). 1999.
- Sánchez LE. **Avaliação de Impacto ambiental: conceitos e métodos**. Oficina de Textos, São Paulo. 2008.
- Santos PS. **Tecnologia de argilas**. Edgard Blücher, São Paulo (SP). 1975. 340 p.
- Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. **Banco de dados Hidrometeorológicos**. 2012. Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_carrega.exe?f=/index/informe_files/dados_daee.html, último acesso em 26 de Abril de 2012.
- Smith PGR, Theberge JB. **A review of criteria for evaluating natural areas**. Environment Management 10, 1986. pp. 715-734.
- Soares SR. **Gestão e Planejamento Ambiental**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC. 2006.
- Spörl C, Ross JLS. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos**. GEOUSP - Espaço e Tempo. 2004. Nº 15. pp. 39-49.
- Teknomo K. **Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial**. 2006. [Acessado em 03/02/2012]. Disponível em: <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/>.
- Tricart J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro (RJ). FIBGE/SUPREN. 1977.
- Vaz LF. **Classificação genética de solo e de perfis de alteração de rocha em regiões tropicais**. Revista Solos e Rochas. ABGE-ABMS. São Paulo (SP). nº 19(2). 1996.
- Zuquette LV. **Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese de Doutorado. EESC, São Carlos - SP. 1987. 673p.
- Zuquette LV. **Importância do Mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para a elaboração [Tese]**. São Carlos (SP). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Vol. 1. 1993. 256p.
- Zuquette LV, Gandolfi N. **Cartografia geotécnica**. Oficina de Textos, São Paulo. 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Base cartográfica digital e documentação.

Legenda

Documentação

Observação de superfície

Observação com amostragem

Sondagem a trado

Sondagem elétrica vertical

Convenções

Limites das Bacias

Limite da Área Urbana

Oleoduto OSBRA

Estacas

Dispositivo válvulas

Dispositivo retificador

Dispositivo PT

Linhas de Transmissão

Rodovias

Drenagem Perene

Intermitente

Espelhos d'água

Curvas de Nível

Curvas Principais (25 m)

Curvas Intermediárias (5 m)

Pontos Cotados (m)

ESCALA GRÁFICA

2500250500

Metros

SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM

CORREGO ALEGRE - FUSO 23S

Folhas Topográficas (1:10.000) da base cartográfica

Localização no Estado de São Paulo

Mosaico de fotos aéreas de 2003, com sombreamento azimute 315° e inclinação 45°.

Mapa de Fragilidade Ambiental: Conceituação e Aplicação em um setor do Oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA).		
Base Cartográfica Digital e Documentação		
Autor: Filipe Biaggioni Quessada Gimenes		
Orientador: Oswaldo Augusto Filho		
Escola de Engenharia de São Carlos - USP		
Data: 15/04/2013	Escala Original 1:25.000	Apêndice A

APÊNDICE B – Mapa de fragilidade ambiental.

Legenda

Documentação

Observação de superfície

Observação com amostragem

Sondagem a trado

Sondagem elétrica vertical

Fragilidade Ambiental

Muito Baixa

Baixa

Média

Alta

Muito Alta

Convenções

Limites das Bacias

Limite da Área Urbana

Oleoduto OSBRA

Estacas

Dispositivo válvulas

Dispositivo retificador

Dispositivo PT

Linhas de Transmissão

Rodovias

Drenagem Perene

Intermitente

Espelhos d'água

Curvas de Nível

Curvas Principais (25 m)

Curvas Intermediárias (5 m)

Pontos Cotados (m)

N

W

E

S

ESCALA GRÁFICA

250

0

250

500

Metros

SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM

CORREGO ALEGRE - FUSO 23S

Folhas Topográficas (1:10.000) da base cartográfica

Localização no Estado de São Paulo

Mosaico de fotos aéreas de 2003, com sombreamento azimute 315° e inclinação 45°.

Mapa de Fragilidade Ambiental: Conceituação e Aplicação em um setor do Oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA).

Mapa de Fragilidade Ambiental

Autor: Filipe Biaggioni Quessada Gimenes

Orientador: Oswaldo Augusto Filho

Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Data: 15/04/2013 | Escala Original 1:25.000 | **Apêndice B**