UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

MONIQUE DE PAULA NEVES

ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO CÓRREGO DO MEIO - MUNICÍPIO DE SÃO PEDRO (SP): ESTUDO DO DESENCADEAMENTO DAS EROSÕES

São Carlos 2017

MONIQUE DE PAULA NEVES

ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO CÓRREGO DO MEIO - MUNICÍPIO DE SÃO PEDRO (SP): ESTUDO DO DESENCADEAMENTO DAS EROSÕES

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos 2017 Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Neves, Monique de Paula
Análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio - Município de São Pedro (SP): Estudo do desencadeamento das erosões / Monique de Paula Neves; orientador Osni José Pejon. São Carlos, 2017.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

erosão linear. 2. limiares de erosão. 3. carta de zoneamento. 4. geoprocessamento. 5. MDE. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela MONIQUE DE PAULA NEVES.

Título da dissertação: "Análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio – município de São Pedro (SP): estudo do desencadeamento das erosões".

Data da defesa: 27/04/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Aprovada.

Prof. Titular **Osni José Pejon** (**Orientador**) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

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

Prof. Dr. José Augusto de Lollo (Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho/UNESP-Ilha Solteira)

INESP-Ilha solteira)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre cuidar de mim com amor tão terno e fiel!

Ao professor Osni Pejon pela caminhada que percorremos juntos. Obrigada pela paciência, amizade e incentivo!

Ao professor David Tarboton por ser sempre solicito e esclarecer todas as dúvidas técnicas!

Ao professor Lázaro Zuquette pela contribuição e amizade!

À professora Valéria Guimarães pela oportunidade da monitoria, e sobretudo pelo carinho e atenção!

Aos professores Eduardo Collares e Ana Carina Collares pela amizade, e estímulo desde a graduação!

Em especial a minha mãe Helenice por ser meu porto seguro! Ao meu pai Cristian e minha irmã Rebeca por serem meus grandes incentivadores! Aos meus avós pelo carinho incomparável, que enriquece meu coração! A todos os tios e tias, primos e primas, obrigada pelo apoio incondicional! Vocês sempre serão a minha base!

Ao meu namorado, amigo e companheiro Gabriel, obrigada por tudo, e principalmente por tornar meus dias mais especiais!

Aos meus amigos queridos, Ana Flávia, Carol, Fernando, Larissa, Lucas e Rhuan por estarem sempre perto, apesar da distância!

Aos amigos de São Carlos, especialmente Yara, Cahio Eiras e Denis Watashi pela parceria em todos os momentos!

A Dagui pelas palavras amigas, na reta final!

A galera do "Map World" por acompanharem os bastidores! Obrigada pelos momentos de descontração, bolachas e cafés... Moisés Failache "thank you" pelas dicas musicais!

Aos colegas do Departamento de Geotecnia pela convivência durante este período!

A todos os técnicos e funcionários do Departamento de Geotecnia pela disposição em ajudar!

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado!

"Tudo é possível àquele que crê" Mc 9,23

RESUMO

NEVES, M. P. Análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio - Município de São Pedro - SP: Estudo do desencadeamento das erosões. 2017. 179 f. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

No âmbito da geomorfologia pressupõe-se que existe uma relação entre declividade (S) e área de contribuição (A) que condiciona o escoamento superficial necessário para ocasionar o surgimento das erosões. A relação entre estes parâmetros pode ser expressa pelo índice $S=aA^{-b}$, que representa o limiar crítico de desencadeamento das erosões. Implementando este índice no SIG, pode-se elaborar produtos cartográficos com a finalidade de reproduzir espacialmente as áreas críticas sujeitas a ocorrência das erosões. O presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo sobre o desencadeamento das erosões lineares, utilizando técnicas de geoprocessamento para obtenção dos parâmetros A e S. A área em estudo compreende a Bacia do Córrego do Meio, localizada no município de São Pedro - SP, e apresenta uma área de 48,06km². Os pontos de feições erosivas foram compilados de trabalhos realizados previamente na área, e também por meio do levantamento em imagens de satélites e ortofotos, totalizando 58 pontos de erosões. O modelo digital de elevação (MDE), mapa de área de contribuição e declividade foram elaborados em ambiente SIG, com diferentes *pixels* de saída, 2, 10 e 30 metros, e para processamento dos dados hidrológicos foram utilizados dois algoritmos: D8 e D-Infinity. Os parâmetros A e S foram calculados para cada uma das feições, analisadas de maneira integrada, e com base em características especificas como posição no relevo e profundidade dos canais. O tamanho do pixel de saída refletiu significativamente na obtenção dos parâmetros A e S, por isso, foram utilizados os modelos com resoluções maiores, pois corresponderam melhor às características da área. Em relação aos algoritmos de fluxo acumulado o D-Infinity apresentou dados mais condizentes com a topografia, e possibilitou o ajuste matemático do limiar crítico no gráfico SxA. O índice obtido a partir da análise integrada foi S=0,060A^{-0,280}, o índice para feições localizadas em encosta S=0,0539A^{-0,412}, e feições em drenagem S=0,0748A^{-0,397}. Além destes, foram obtidos outros índices específicos, determinados conforme a profundidade das feições (<0,5; 0,5 a 1; 1 a 1,5 e >1,5m). A implementação dos índices no SIG possibilitou a elaboração das Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosão que apresentaram resultados consistentes, quando comparadas com outros produtos cartográficos, e podem orientar a ocupação adequada nestes locais, evitando a deflagração de novos processos. Apesar de ser um modelo de predição de erosão simples, os dados obtidos auxiliaram a compreensão dos mecanismos de desencadeamento, por isso, podem subsidiar as ações de planejamento ambiental, visando à recuperação das áreas comprometidas, com o intuito de minimizar os danos ambientais, e as perdas econômicas e sociais.

Palavras-chave: erosão linear; limiares de erosão; carta de zoneamento; geoprocessamento; MDE.

ABSTRACT

NEVES, M. P. Analysis of the erosive processes at Córrego do Meio Wastershed -Municipality of São Pedro - SP: study of erosion initiation. 2017. 179 f. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Considering the geomorphology aspects, it is assumed that there is a relationship between slope (S) and contributing area (A) which determines the runoff necessary for the onset of erosion. The relationship between the morphometric parameters can be expressed by the index $S=aA^{-b}$ which represents the topographic threshold for the onset of erosion. Implementing this index in the GIS, cartographic products can be performed with the purpose of reproducing spatially the critical areas subject to the erosion occurrence. The aim of this work is the study if the onset of gully erosions using geoprocessing techniques to obtain the parameters A and S. The study area is the watershed of the Córrego do Meio, located in São Pedro, São Paulo state, with an approximated area of 48.06km². The erosion feature was compiled from previous study in the area and also through the survey on satellite images and orthophotographs, totalizing 58 erosion points. The digital elevation model (DEM), contribution area and slope were performed in GIS, with different output pixels, 2, 10 and 30 meters, and for the hydrological data processing, two algorithms were used: D8 and D-Infinity. The parameters A and S were calculated for each of the erosion feature, which were analyzed as a whole, and also based on the specific characteristics such as position in the landforms and depth of the channels. The size of the output pixel reflected significantly in obtaining the parameters A and S, therefore, models with higher resolutions were used because they better represent the characteristics of the area. In relation to the flow accumulation algorithms, D-Infinity presented more consistent data with the topography, and enabled the mathematical adjustment of the threshold in the SxA chart. The index obtained from the analysis of all erosion was $S=0.060A^{-0.280}$, the index for erosions located in hillside $S=0.0539A^{-0.412}$, and erosions in drainage $S=0.0748A^{-0.397}$. Besides these, other specific indices were determined, according to the depth of the channels (<0.5, 0.5 to 1, 1 to 1.5 and > 1.5m). The implementation of the indexes in the GIS made possible to perform the Zoning Map of Probable Erosion Areas, which showed consistent results when compared to other cartographic products and may direct suitable occupancy in these locations, so as to avoid the onset of new processes. Although it is a model for prediction of simple erosion, the obtained data helped to understand the mechanisms of the onset of the gully erosion, and therefore, can subsidize the actions of environmental planning, aiming at the recovery of the committed areas, with the aim of minimizing environmental damage and economic and social losses.

Keywords: gully erosion, threshold of erosion, zoning map, geoprocessing, DEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores que contribuem para ocorrência dos processos erosivos.	27
Figura 2 - Velocidade crítica da água necessária para que ocorra erosão, transp	orte e
deposição, em função do tamanho das partículas	29
Figura 3 - Sulco localizado em São Pedro - SP	32
Figura 4 - Ravina localizada em São Pedro - SP	33
Figura 5 - Voçoroca localizada em São Pedro - SP	34
Figura 6 - Classificação das encostas proposta por Ruhe (1975)	38
Figura 7 - Métodos de avaliação da erosão hídrica.	42
Figura 8 - Gráfico SxA para erosões laminares (Colorado).	45
Figura 9 - Limiares topográficos conforme os processos dominantes (Mar Mediterrâneo)47
Figura 10 - Gráfico SxA para canais localizados na Bélgica.	48
Figura 11 - Mapa de áreas críticas (Sudoeste Espanha).	49
Figura 12 - Gráficos SxA para diferentes método de obtenção dos parâmetros	50
Figura 13 - Gráfico SxA para canais localizados na região de São Pedro - SP	51
Figura 14 - Gráfico SxA para canais localizados em Piratinga - SP	52
Figura 15 - Representação do índice geomorfológico	53
Figura 16 - Limiares críticos na paisagem	55
Figura 17 - Limiares de saturação do solo, de erosão por escoamento superfic	cial, e
deslizamento.	55
Figura 18 - Documentos cartográficos produzidos pelo mapeamento geotécnico	58
Figura 19 – Atributos do meio físico associados à erosão.	59
Figura 20 - Estrutura de um SIG	62
Figura 21 - Representação dos formatos vetoriais e matriciais	65
Figura 22 - Processamento para obtenção do MDE.	66
Figura 23 - Representação da ferramenta Fill.	67
Figura 24 - Direção de fluxo pelo método D8	70
Figura 25 - Direção de fluxo pelo método D-Infinity.	71
Figura 26 - Mapa de influência para os diferentes métodos	71
Figura 27 - Representação do fluxo acumulado.	72
Figura 28 - Etapas para elaboração do mapa de área de contribuição no TauDEM	73
Figura 29 - Etapas para elaboração do mapa de área de contribuição no ArcGIS	74

Figura 30 - Representação do limiar (threshold)	4
Figura 31 – Etapas para obtenção dos aspectos hidrológicos	5
Figura 32 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Córrego do Meio 7	7
Figura 33 - Distribuição das chuvas na região de São Pedro7	8
Figura 34 - Mapa de uso e ocupação da terra (2013) da Bacia do Córrego do Meio 8	2
Figura 35 - Etapas de trabalho	4
Figura 36 - Mosaico das cartas topográficas da área em estudo	6
Figura 37 - Métodos para determinar as direções de fluxo	9
Figura 38 - Etapas para elaboração do mapa de área de contribuição	9
Figura 39 - Representação da ferramenta "D-Infinity Upslope Dependence"	0
Figura 40 - Exemplo de ajuste do limiar topográfico	1
Figura 41 - Processamento para elaboração da carta de zoneamento	2
Figura 42 - Mapa de documentação da Bacia do Córrego do Meio	7
Figura 43 - Percentual de ocorrência das unidades de landforms 10	2
Figura 44 - Mapa de Landforms da Bacia do Córrego do Meio 10	3
Figura 45 - Mapa de Substrato Rochoso da Bacia do Córrego do Meio 10	5
Figura 46 - Percentual de ocorrência das unidades de materiais inconsolidados 10	6
Figura 47 - Mapa de materiais inconsolidados da Bacia do Córrego do Meio 10	7
Figura 48 - Modelos Digitais de Elevação (MDE) 11	2
Figura 49 - Representação da declividade 11	3
Figura 50 - Percentual de ocorrência das classes de declividades 11	3
Figura 51 - Cartas de Declividades 11	4
Figura 52 - Variabilidade espacial das classes de declividade11	5
Figura 53 - Valores máximo de fluxo acumulado para a Bacia do Córrego do Meio em funçã	0
do tamanho do pixel11	6
Figura 54 - Mapa de Fluxo Acumulado (D8) 11	7
Figura 55 - Mapa de Fluxo Acumulado (D-Infinity) 11	8
Figura 56 - Mapas de fluxo acumulado e feições erosivas 11	9
Figura 57 - Áreas de contribuição determinadas pelo D-Infinity com pixels de diferente	2S
tamanhos	0
Figura 58 - Gráfico SxA para os dados processados com pixels de diferentes tamanhos 12	1
Figura 59 - Canais rasos visualizados nas ortofotos 12	2
Figura 60 - Gráfico SxA - Canais Rasos 12	3
Figura 61 - Canais profundos visualizados nas ortofotos	3

Figura 62 - Gráfico SxA - Canais profundos124
Figura 63 - Áreas de contribuição processadas automaticamente com os algoritmos D8 e D-
Infinity
Figura 64 - Critérios para classificação das feições
Figura 65 - Gráfico SxA das feições localizadas em encosta128
Figura 66 - Gráfico SxA das feições localizadas em drenagem129
Figura 67 - Localização das feições na região da Serra de Itaqueri
Figura 68 - Perfil topográfico das encostas localizadas na Serra de Itaqueri131
Figura 69 - Gráfico SxA - Bacia do Córrego do Meio132
Figura 70 - Posicionamento do limiar critico no gráfico de Dietrich et al. (1992)
Figura 71 - Níveis de detalhamento para elaboração dos limiares críticos
Figura 72 - Feições localizadas em encosta134
Figura 73 - Gráfico SxA para as feições localizadas em encosta da Bacia do Córrego do Meio.
Figura 74 - Gráfico SxA para as feições localizadas em encosta conforme a profundidade dos
canais
Figura 75 - Feições localizadas em drenagem
Figura 76 - Gráfico SxA para as feições localizadas em drenagem da Bacia do Córrego do
Meio
Figura 77 - Gráfico SxA para as feições localizadas em drenagem conforme a profundidade
dos canais
Figura 78 - Representação detalhada das áreas críticas140
Figura 79 - Carta Geral de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosão141
Figura 80 - Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Encosta145
Figura 81 - Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Drenagem147
Figura 82 - Percentual de ocorrência das classes de susceptibilidade150
Figura 83 - Carta de Susceptibilidade à Erosão de Gomes (2002)151
Figura 84 - Processo erosivo localizado em área de chacreamento
Figura 85 - Percentual de áreas de ocorrência de erosões coincidentes com as classes de
susceptibilidade
Figura 86 - Carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões sobreposta às classes de
susceptibilidade
Figura 87 - Percentual de áreas de ocorrência de erosões em encosta coincidentes com as
classes de susceptibilidade

Figura 88 - Carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões em enc	costa sobreposta às
classes de susceptibilidade	156
Figura 89 - Percentual de áreas de ocorrência de erosões em drenagem co	oincidentes com as
classes de susceptibilidade	
Figura 90 - Carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões em dre	enagem sobreposta
às classes de susceptibilidade	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de erosão e agentes causadores	27
Tabela 2 - Processos envolvidos na formação das erosões	
Tabela 3 - Características das feições erosivas	35
Tabela 4 - Características dos solos que interferem nos processos erosivos	
Tabela 5 - Exemplos de ensaios para avaliação da erodibilidade dos solos	40
Tabela 6 - Agentes deflagradores dos processos erosivos	41
Tabela 7 - Modelos de avaliação quantitativa indireta das erosões	43
Tabela 8 - Métodos e fontes de informação utilizadas	45
Tabela 9 - Autores, locais e coeficientes a e -b.	46
Tabela 10 - Softwares de geoprocessamento	61
Tabela 11 - Softwares livres análise hidrológica	68
Tabela 12 - Algoritmos utilizados nas análises hidrológicas	69
Tabela 13 - Características litoestratigráficas das formações presentes na área em e	estudo 79
Tabela 14 - Dados referentes às principais unidades de materiais inconsolidados d	la região em
estudo	79
Tabela 15 - Área e percentual das classes do uso e cobertura do solo	81
Tabela 16 - Materiais e softwares utilizados na pesquisa	83
Tabela 17 - Estrutura do banco de dados da Bacia do Córrego do Meio	85
Tabela 18 - Característica das ortofotos	87
Tabela 19 - Definição das classes de declividade	
Tabela 20 - Pontos de feições erosivas da Bacia do Córrego do Meio	99
Tabela 21 - Características dos sistemas e unidades de landforms	101
Tabela 22 - Dados referentes aos materiais inconsolidados presentes na Bacia do	Córrego do
Meio	110
Tabela 23 - Número de colunas e linhas dos modelos digitais de elevação	111
Tabela 24 - Índices SxA para a Sub-bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro	125
Tabela 25 - Valores do coeficiente de determinação (r ²) para diferentes análises,	utilizando o
D-Infinity	129
Tabela 26 - Índices SxA para a Bacia do Córrego do Meio	139
Tabela 27 - Classes de susceptibilidade definidas por Gomes (2002)	149

LISTA DE SIGLAS

А	Área de Contribuição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Acb	Índice de atividade da fração fina
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
E	Índice de Erodibilidade
EUPS	Equação Universal de Perda dos Solos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IG	Instituto Geológico
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDE	Modelo Digital de Elevação
Р	Perda de peso por imersão
PIB	Produto Interno Bruto
PMSP	Prefeitura Municipal de São Pedro
R ²	Coeficiente de determinação
S	Índice de absorção d'água
S	Declividade média
SE	Superfície Específica
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UTM	Universal Transverse Mercator
VB	Volume de azul de metileno

Sumário

1. INTRODUÇÃO	
1.1 Objetivos	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Bacia hidrográfica como unidade de planejamento	23
2.2 Aspectos conceituais relativos à erosão	25
2.2.1 Definição	25
2.2.2 Tipos de erosão	27
2.2.3 Feições erosivas	30
2.2.4 Fatores condicionantes	35
2.3 Avaliação dos processos erosivos	42
2.3.1 Modelos estatísticos, físicos e paramétricos	42
2.4 Índices que relacionam área de contribuição x declividade	44
2.4.1 Limiar para representação das áreas instáveis	52
2.5 Mapeamento geotécnico	56
2.5 Geoprocessamento como ferramenta de auxílio	60
2.5.1 Sistema de informação geográfica (SIG)	62
2.5.2 Sensoriamento remoto	63
2.5.3 Processamento automático	64
3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	77
3.1 Clima	78
3.2 Vegetação	78
3.3 Geologia e Geomorfologia	79
3.3.1 Materiais inconsolidados	79
3.4 Pedologia	80
3.5 Aspectos Hidrológicos	

3.5.1 Hidrogeologia	
3.5.2 Hidrologia	
3.6 Uso e Ocupação do Solo	
4. MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1 Materiais	
4.2 Métodos	
4.2.1 Compilação de dados	
4.2.2 Sensoriamento Remoto	
4.2.3 Processamento dos dados em SIG	
4.2.4 Índices SxA	
4.2.5 Zoneamento de áreas críticas de processos erosivos	
5. RESULTADOS	
5.1 Documentos Cartográficos	
5.1.1 Mapa de Documentação	
5.1.2 Mapas Geológicos-Geotécnicos	100
5.2 Dados de ensaios geotécnicos	
5.3 Processamento de Dados em SIG	
5.3.1 MDE (Modelo Digital de Elevação)	
5.3.2 Carta de Declividades	
5.3.3 Aspectos Hidrológicos	
5.4 Índice SxA: Sub-bacia dos Alpes e Retiro	
5.4.1 Interferência da resolução espacial na elaboração dos	índices 120
5.4.2 Aplicação do D-Infinity para os índices propostos por	Araújo (2011) 121
5.4.3 Refinamento do Modelo	
5.5 Índice SxA: Bacia do Córrego do Meio	
5.5.1 Análise Integrada	
5.5.2 Análise de acordo com a classificação das feições	

ANEXO A	177
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
7. RECOMENDAÇÕES	165
6.3 Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões	163
6.2 Índices SxA	162
6.1 Processamento automático	161
6. CONCLUSÕES	161
5.6.4 Comparação das Cartas de Zoneamento com a Carta de Susceptibilidade	149
5.6.3 Erosões em Drenagem	143
5.6.2 Erosões em Encosta	143
5.6.1 Geral	139
5.6 Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões com base nos limiares topográf	ficos 139

1. Introdução

Os processos erosivos podem ocorrer de maneira natural ou acelerada, na primeira condição se caracterizam como um processo lento, de remodelação do relevo, onde as taxas de erosão e perda de sedimentos estão inseridas em uma dinâmica natural da superfície terrestre. Por outro lado, a erosão acelerada é decorrente das intervenções antrópicas e ocorrem em taxas superiores à erosão natural, ocasionando consequentemente a degradação ambiental, que resulta em perdas ambientais, econômicas e sociais (ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

As principais consequências causadas pela erosão são alteração na morfometria do relevo; rebaixamento do nível d'água; remoção das camadas superficiais de solo; assoreamento de cursos d'água; remoção dos nutrientes do solo; redução da produção agrícola. Em áreas urbanas podem atingir obras residenciais e de infraestrutura, como estradas, pontes, aterros, tubulações, taludes artificiais e outros (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; GUERRA, 1998; ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

O surgimento das feições erosivas depende de alguns fatores naturais como clima (chuva), geomorfologia, tipo de solo, substrato rochoso e cobertura vegetal. Considerando apenas os aspectos geomorfológicos pressupõe-se que existe uma relação entre declividade (S) e área de contribuição (A), que condiciona o escoamento superficial necessário para dar início à erosão (PATTON; SCHUMM, 1975). A partir da relação proposta pelos autores citados, Begim e Schumm (1979) e Montgomery e Dietrich (1994) definiram uma equação para representar o limiar crítico de desencadeamento das erosões: $S=aA^{-b}$, onde "*a*" e "-*b*" são coeficientes que dependem das características do ambiente.

Outra maneira de estudar os processos erosivos é através da elaboração de mapas e cartas geotécnicos, a partir da análise de atributos do meio físico, como geologia, hidrogeologia, hidrologia, entre outros, com a finalidade de avaliar as limitações e potencialidades de uma determinada área. Entre as cartas geotécnicas aplicadas a erosão citam-se: carta de potencial à erosão laminar; carta de susceptibilidade; carta de erodibilidade; carta de risco potencial à erosão acelerada; entre outras. As cartas de susceptibilidade, por exemplo, podem ser elaboradas através do agrupamento hierárquico dos atributos do meio físico, como materiais inconsolidados, substrato rochoso, *landforms* e declividade.

Ao aplicar a equação que representa o limiar crítico de desencadeamento das erosões $(S=aA^{-b})$, no SIG (Sistema de Informação Geográfica) pode-se elaborar um outro tipo de produto cartográfico, que consiste na representação espacial das áreas críticas onde é possível ocorrer a formação de canais de erosão. Desta maneira, podem ser elaboradas cartas de zoneamento que indiquem as áreas críticas e estáveis em uma encosta, e assim orientar a tomada de decisão do gestor público, no sentido de impedir a degradação e minimizar os danos aos recursos naturais e ao meio ambiente.

Diante deste cenário, o presente trabalho apresenta um estudo sobre o desencadeamento das erosões lineares da Bacia do Córrego do Meio, localizada no município de São Pedro - SP. Para desenvolvimento do estudo, considerou-se o método de Patton e Schumm (1975), que estabelece a relação inversa entre área de contribuição (A) e declividade (S), e a aplicação de técnicas de geoprocessamento para obtenção destes parâmetros e elaboração das cartas de zoneamento em ambiente SIG.

Diversos estudos foram realizados considerando a abordagem destes autores, como Vandaele et al. (1996); Vanwalleghem et al. (2005); e Menéndez-Duarte et al. (2007), Gutiérrez et al. (2009); Araújo (2011) e Stabile (2013). Entretanto, poucos foram aplicados em áreas tropicais, com exceção dos dois últimos, desenvolvidos no Brasil, isto enfatiza a importância deste trabalho, visto a necessidade de determinar limiares críticos de desencadeamento das feições considerando as condições geomorfológicas dos países tropicais.

A seleção da Bacia do Córrego do Meio se deve aos diversos estudos já desenvolvidos na área ou no seu entorno, como: Pejon (1992); Gomes (2002); Silva (2003); Dantas-Ferreira (2008); Guimarães (2008); Araújo (2011), entre outros, que constataram a alta incidência de feições erosiva na área, com base na elaboração de mapas e cartas, e análise geotécnica dos processos erosivos. No entanto, nenhum deles estabeleceu o limiar crítico de desencadeamento das erosões para a área em estudo como um todo.

Desta forma, este trabalho se justifica, pois, pretende-se consolidar os estudos realizados, através da proposição do limiar crítico de desencadeamento das erosões *(threshold)* e da elaboração das cartas de zoneamento de áreas de ocorrência de erosão, integrando as informações geotécnicas e espaciais existentes, por meio das ferramentas de geoprocessamento. Os resultados obtidos irão indicar as áreas com predisposição para

ocorrência de erosão, e por isso, poderão orientar as ações em termos de planejamento ambiental na área, evitando os problemas decorrentes da degradação ambiental.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo do desencadeamento das erosões lineares na Bacia do Córrego do Meio a partir da relação entre área de contribuição (A) e declividade (S), determinadas com o auxílio do geoprocessamento. São objetivos específicos:

- Avaliar a interferência da resolução espacial do MDE na elaboração dos parâmetros A e S;
- Avaliar os diferentes algoritmos de fluxo acumulado: D8 e D-Infinity;
- Propor os índices SxA com base nas características das feições erosivas;
- Representar espacialmente os limiares críticos por meio da carta de zoneamento de áreas prováveis de ocorrência de erosão.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Bacia hidrográfica como unidade de planejamento

A bacia hidrográfica é definida como uma área de drenagem composta por cursos d'água que convergem até um ponto de saída, o exutório. Esta área é limitada por divisores topográficos, que correspondem aos pontos de maior cota do terreno, e, portanto, são denominados divisores de água (JORGE; UEHARA, 1998).

Porto e Porto (2008) consideram a bacia hidrográfica como um sistema integrado, sobre o qual se realizam os balanços de entrada e saída de água, que tem seu início com a entrada da água da chuva e o fim com sua saída no exutório. A relação existente entre os diversos sistemas hídricos origina as bacias e sub-bacias hidrográficas.

É importante ressaltar, que sobre esta área de drenagem, são desenvolvidas diversas atividades antrópicas, que ocasionam diferentes processos de degradação ambiental (CALIJURI; CUNHA; POVINELLI, 2010). Portanto, segundo Yassuda (1993) a gestão dos recursos hídricos deve ser realizada de forma integrada, garantindo a conservação, preservação e recuperação do meio físico, de maneira equilibrada e sustentável.

Ao desenvolver seu trabalho, Yassuda (1993) verificou que muitos países como Alemanha, França, Inglaterra e Portugal, já haviam implementado a gestão integrada, indicando que o gerenciamento da água, como recurso natural renovável, deve ser realizado no âmbito do ciclo hidrológico, considerando a interação entre os meios físico, biótico, social e econômico.

Sobre a experiência na França, Machado (2003) cita que em 1964 foi elaborada a Lei das Águas - Nº64 - 1245, que surgiu em decorrência dos problemas enfrentados pelo país, dentre eles, a redução da qualidade da água. Com a finalidade de solucionar tais problemas, o país adotou a bacia hidrográfica como unidade administrativa dos recursos hídricos, uma vez que se caracteriza como uma área geográfica natural do ciclo hidrológico. Após este marco, diversos países elaboraram programas de gestão de recursos hídricos baseado no modelo francês.

Muitas experiências relacionadas à gestão de bacias hidrográficas aconteceram no Brasil, previamente a elaboração de uma política de recursos hídricos específica. Em 1978 foi criado em São Paulo o Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas; no Espírito Santo em 1980 foi constituído o Consórcio Intermunicipal; em 1988 no Rio Grande do Sul foram criados os Comitês de Bacias e, em 1989 nas bacias dos rios Piracicaba e Capivari foi formado um Consórcio Intermunicipal de Bacias. Neste mesmo período, a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) realizava uma mobilização para a criação de um sistema organizado de gestão (PORTO; PORTO, 2008).

Neste contexto, em janeiro de 1997 foi sancionada a Lei Federal Nº 9.433 - Política Nacional dos Recursos Hídricos, que estabeleceu os fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos para a gestão da água em âmbito nacional. Como um de seus fundamentos a Lei Federal instituiu a *"bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos"* (BRASIL, 1997).

Autores como Silva (2000); Tundisi (2006); Calijuri; Cunha e Povinelli (2010) afirmam que muitos avanços foram alcançados com a aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos, dentre eles, o mais significativo foi à adoção da bacia hidrográfica como unidade físico-territorial de gerenciamento e planejamento. Segundo Calijuri; Cunha e Povinelli (2010), a bacia hidrográfica pode indicar a qualidade ambiental de uma determinada área, permitindo a avaliação de problemas como poluição das águas, assoreamento de cursos d'água e escassez hídrica, e sua adoção como unidade físico-territorial representa um avanço no âmbito da sustentabilidade. Os autores exemplificam citando o programa de gestão de recursos hídricos de Nova York (*New York City Watershed Program*) que assegura a proteção dos mananciais que abastecem a população, sendo que, além disso, em todo o estado deve ser garantido o monitoramento, avaliação e manejo dos sistemas aquáticos.

Para Tundisi (2006), este avanço representa uma mudança de paradigma no processo de gestão dos recursos hídricos, pois o sistema passou a ser integrado e preditivo, e também se insere no contexto de um ecossistema hidrologicamente interligado, com seus componentes e subsistemas. A gestão por bacias hidrográficas permite obter também progressos tecnológicos, uma vez que favorece a integração do planejamento territorial e uso do solo com a gestão dos recursos hídricos.

Segundo Silva (2000), a adoção da bacia hidrográfica como unidade de gestão contribui para o ordenamento de todas as atividades desenvolvidas, considerando a relação existente entre a disponibilidade de água e as necessidades humanas. A gestão da água deve promover a melhoria da qualidade de vida, o aproveitamento e proteção dos recursos hídricos, desta forma, a bacia hidrográfica se caracteriza como unidade física mais apropriada para estudos ambientais.

Neste contexto, verifica-se que o planejamento integrado é peça fundamental para a gestão dos recursos hídricos, pois de acordo com Porto e Porto (2008) é sobre este território que ocorrem quase todas as atividades humanas: ocupação urbana; atividades industriais; uso do solo e também a presença de áreas de preservação, por isso, todas as consequências ambientais geradas são resultantes das formas de ocupação e dos diversos usos dos recursos hídricos.

2.2 Aspectos conceituais relativos à erosão

2.2.1 Definição

O termo erosão tem sua origem da palavra "*erodere*" em latim, que significa desgastar. No âmbito geológico, o termo foi utilizado pela primeira vez para delinear alguns processos, como a formação de depressões no terreno devido à ação da água da chuva. A palavra erosão é utilizada para descrever os processos de desagregação de partículas de solo ou rocha, devido à ação de fatores externos, como água, neve, gelo, vento e organismos (ZACHAR, 1982).

De acordo com Lal (1994), a palavra erosão denota os processos que envolvem o desgaste da paisagem, especificamente a remoção e arraste das partículas do solo, seguida pela deposição deste material.

Vilar e Prandi (1993) definem a erosão como os diversos processos que ocasionam a desagregação, desgaste e transporte dos materiais presentes na crosta terrestre, devido à ação das geleiras, rios, mares, ventos ou chuva. Estes processos ocorrem naturalmente, de maneira lenta e contínua, conforme o desenvolvimento da paisagem. No entanto, a interferência antrópica pode intensificá-los, originando processos mais complexos.

Em relação às etapas do processo erosivo, para Guerra (1998) a primeira delas consiste na remoção, seguida pelo transporte do material removido, e por fim, quando não existe mais energia para dar continuidade no processo, ocorre a deposição. O autor ressalta que, todo este processo só ocorre quando as forças atuantes, ou seja, aquelas com capacidade de remover e transportar as partículas de solo ou rocha for maior que a sua capacidade de resistência.

Desta forma, os processos erosivos podem ocorrer com ou sem a influência humana, ocasionando dois tipos de erosão, geológica e acelerada (LAL, 1994). De acordo com Salomão e Iwasa (1995) o processo da erosão natural ou geológica, se desenvolve com a mesma intensidade da formação do solo, ou seja, em condições de equilíbrio. A erosão acelerada ou antrópica por sua vez, ocorre com intensidades superiores, o que não favorece a recuperação natural do local.

A erosão é classificada como natural quando ocorre lentamente ao longo do tempo geológico em um ambiente controlado apenas por fatores naturais. Quando este tipo de erosão sofre interferência devido às mudanças climáticas ou geológicas, modificando a velocidade e a intensidade do processo, consiste em um processo de erosão acelerada, onde a remoção do material inconsolidado torna-se mais rápida do que sua reposição pelos processos de intemperismo das rochas. O processo é lento quando comparado com processos acelerados pela ação do homem e, se torna perceptível, em milhares de anos (PEJON, 1992).

Para o referido autor, a erosão antrópica ocorre quando o homem interfere no ambiente natural acelerando os processos erosivos, por isso é considerada como erosão acelerada. Este tipo de processo é muito mais rápido que a erosão natural e pode evoluir em poucos anos, atingindo extensas áreas.

Segundo Vilar e Prandi (1993) as partículas de solo erodidas, que foram desagregadas e transportadas, podem se depositar em diversos lugares, ocasionando assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Para os autores a erosão acelerada ocasiona várias consequências no ambiente como redução de áreas agrícolas; degradação e contaminação de cursos d'água; perdas de bens públicos; prejuízos sociais e econômicos.

De acordo com Barrow (1991), a ocorrência dos processos erosivos está condicionada por alguns fatores como: erosividade, erodibilidade, proteção do solo e manejo do terreno (Figura 1). A erosividade corresponde à capacidade que a chuva possui de causar erosão e, é determinada em função da intensidade e duração dos eventos. A erodibilidade consiste na vulnerabilidade do solo à ocorrência de processos erosivos em decorrência de suas propriedades. A proteção do solo é proporcionada pela presença de vegetação, e o manejo está relacionado com as formas de uso do terreno.



Figura 1 - Fatores que contribuem para ocorrência dos processos erosivos.

Fonte: Adaptado de Barrow (1991).

2.2.2 Tipos de erosão

A erosão pode ser causada por diferentes agentes, como água, gelo e vento, que por sua vez estão relacionados com uma série de fatores naturais como: clima, geomorfologia, substrato rochoso, materiais inconsolidados e cobertura vegetal. A Tabela 1 apresenta os diferentes tipos de erosão e os agentes deflagradores.

Tubera 1 Tipos de crosao e agentes causadore	Tabela	1 - Tipos	de erosão	e agentes	causadores
--	--------	-----------	-----------	-----------	------------

Tipo de agente		Tipo de erosão		
Vento		Eólica		
	Chuva			Pelo impacto das gotas
			Superficial	Sulcos
Fluidos				Ravinas
	Água	Escoamento		Voçorocas
				Canais Fluviais
			Subsuperficial	Em condutos subterrâneos
		Oceano		Costeira
	Glacial			
	Maximum de manage			Avalanche
Curridade				Escorregamento
Graviaade	Movimento de massa		Solifluxão	
				Rastejo

Fonte: Adaptado de Lal (1990).

2.2.2.1 Erosão Eólica

Consiste na desagregação e remoção das partículas do solo e rocha, devido à ação do vento, que possui capacidade suficiente para deslocar e elevar as partículas, que podem ser

movimentadas, entrando em estado de suspensão ou saltação. Este tipo de erosão ocorre em áreas com ausência de precipitação e predomínio de altas temperaturas, ou seja, em regiões áridas (ZACHAR, 1982).

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990) a ação do vento ocasiona a remoção de partículas de solo, rochas e minerais presentes na superfície, especificamente nas rochas, sua ação se deve a abrasão, devido à presença dos grãos de areia e partículas de solo em movimento.

2.2.2.2 Erosão Glacial

A erosão glacial ocorre em locais com baixas temperaturas, onde o gelo atua desfragmentando e carreando fragmentos rochosos, de maneira semelhante à ação da água. No entanto, o processo ocorre com maior velocidade e turbulência, pois o gelo apresenta maior rigidez e capacidade de fundir-se (ZACHAR, 1982).

2.2.2.3 Erosão Hídrica

O processo da erosão hídrica é ocasionado pela ação da água que mobiliza as partículas do solo e também ocasiona o seu transporte. A erosão hídrica está condicionada com as diversas fontes de água existente, como água da chuva (erosão pluvial); água de rios (erosão fluvial); água de lagos (erosão lacustre); água do mar (erosão marinha), entre outras (ZACHAR, 1982).

Segundo Salomão et al. (2012), em países tropicais os processos do meio físico ocorrem sobre forte influência do clima, especificamente das águas, ocasionando diversas consequências, dentre elas, a erosão hídrica. De acordo com Guerra (1998), em regiões de clima tropical, a erosão causada pela água da chuva ocorre devido aos índices pluviométricos elevados, que podem concentrar-se em determinadas épocas do ano, agravando ainda mais o processo.

Sobre estes processos Vilar e Prandi (1993) afirmam que a gota da chuva, ao incidir sobre o solo, possui capacidade de destacar e movimentar as partículas, a água resultante deste processo infiltra ou condiciona o início do processo de escoamento superficial, que poderá ocorrer sobre a forma de fluxo concentrado ou em forma de filetes, dependendo das condições do terreno e da velocidade da enxurrada. Neste contexto, fica evidente que os processos erosivos são condicionados por uma série de fatores que determinam os mecanismos de infiltração da água no solo, seu armazenamento e escoamento. De acordo com Salomão e Iwasa (1995), a compreensão destes processos determina duas condições iniciais distintas, que ocasionam a formação de feições erosivas: o impacto da gota da chuva e o escoamento superficial.

Conforme os referidos autores, o impacto da gota da chuva sobre o solo acarreta apenas a desagregação das partículas do solo, enquanto que o escoamento superficial promove o transporte deste material. Em relação ao escoamento superficial, este pode ocorrer de forma difusa, ocasionando a remoção progressiva e uniforme do solo, resultando em um processo linear, e também de forma concentrada, ocasionando incisões sobre o terreno. É importante ressaltar que todo este processo pode sofrer interferência devido ao tamanho da partícula do solo, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Velocidade crítica da água necessária para que ocorra erosão, transporte e deposição, em função do tamanho das partículas.



Fonte: Adaptado de Hjulstrom (1935) apud Guerra (1998)

Tanto a erosão natural quanto à acelerada podem ocorrer de forma laminar ou por escoamento concentrado. O processo ocorre de maneira laminar quando não há concentração da água da chuva em canais definidos, na superfície do solo, como um todo. A erosão concentrada ocorre quando há formação de canais de água, em proporções diferentes, desde pequenos sulcos ou ravinas, até voçorocas (PEJON, 1992).

Desta forma, segundo Guerra (1998), o estudo dos processos erosivos, devido à ação da água, deve ser realizado com base na compreensão dos mecanismos envolvidos na formação das feições. A Tabela 2 apresenta as características relacionadas aos processos envolvidos na formação das erosões hídricas.

Processos	Características
Infiltração	 Durante um evento chuvoso, parte da água cai diretamente no solo e outra parte é interceptada pela vegetação. A água que cai sobre o solo pode infiltrar ou ser armazenada, em relação ao processo de infiltração, quando o solo não conseguir absorver mais a água, inicia-se o processo de movimentação das partículas, provocando a formação de feições erosivas; As taxas de infiltração podem variar ao longo do evento ou em função das características do solo, no início do processo tendem a ser mais rápidas e, diminuem quando o solo atinge a capacidade máxima de absorção; em relação à textura do solo, os arenosos possuem maiores taxas que os argilosos; A compreensão dos mecanismos de infiltração deve ter com base as características da chuva, as propriedades do solo e encosta.
Escoamento Superficial	 Ocorre quando a capacidade de armazenamento da água no solo é saturada e também quando a capacidade de infiltração é excedida; O fluxo resultante do escoamento superficial raramente se apresenta na forma de um lençol de água, e sua interação com as gotas da chuva, aumenta sua energia; A ausência da cobertura vegetal favorece o impacto das gotas da chuva, o que aumenta os efeitos do escoamento superficial, e consequentemente a ocorrência de maiores taxas de erosão; A remoção da camada de matéria orgânica e nutrientes do solo reduz a resistência do solo frente ao impacto da gota da chuva, aumentando também as taxas de escoamento superficial.
Escoamento Subsuperficial	 O escoamento superficial afeta diretamente a erodibilidade dos solos, especificamente das suas propriedades hidráulicas; Quando ocorre em fluxos concentrados ocasiona o colapso das camadas superiores do solo, resultando na formação das voçorocas; Pode ocorrer também o movimento lateral da água nas encostas, resultando na redução da permeabilidade em subsuperfície, que por sua vez, ocasiona o aumento do escoamento subsuperficial.
Piping	 Os dutos (pipes) ou canais abertos em superfície favorecem a formação de fluxos de água em zonas preferenciais, que transportam material em grande quantidade, e consequentemente induz a ocorrência de colapsos do solo acima, originando grandes voçorocas; Os dutos podem ocorrer nas paredes laterais das voçorocas, provocando a ampliação das feições; Nos países frios os dutos ocorrem devido ao derretimento da neve, e nos tropicais devido a chuvas prolongadas.
Splash	 Este tipo de erosão ocorre como um resultado das forças devido ao impacto da gota da chuva, que possuem capacidade de remover as partículas; Se em um determinado evento a erosividade da chuva for constante, o fluxo do solo devido ao impacto é dado em função do gradiente da encosta, uma vez que a distância média dependente da declividade; O efeito <i>splash</i> pode ocasionar também a formação de uma crosta na superfície, ou seja, uma camada mais resistente à energia cinética da chuva, reduzindo assim a sua ação erosiva. Deve-se considerar também que a crosta reduz a infiltração e aumenta o escoamento superficial.

Tabela 2 - Processos envolvidos na formação das erosões.

Fonte: Adaptado de Guerra (1998).

2.2.3 Feições erosivas

O processo da erosão hídrica tem início com o impacto da gota da chuva que condiciona a formação do processo de escoamento superficial e o surgimento da erosão laminar. À medida que a água escoa sobre a encosta, a velocidade do fluxo aumenta,

originando incisões maiores no solo, denominadas ravinas, que são canais contínuos. Devido à ação do escoamento superficial e subsuperficial as ravinas podem alargar e originar as voçorocas, que são canais mais largos e profundos (GUERRA, 1998).

Segundo Pejon (1992) os sulcos ou ravinas se caracterizam por apresentar dimensões relativamente pequenas, enquanto que as voçorocas podem atingir grandes áreas, ocasionando a formação de canais com dezenas de metros, que muitas vezes interceptam o nível d'água, causando consequências tanto no meio urbano como rural.

2.2.3.1 Erosão laminar (intersulcos)

A erosão laminar está relacionada com o processo de escoamento superficial que ocorre na encosta de forma dispersa, com profundidade uniforme e sem canais definidos. Este tipo de escoamento está condicionado à ocorrência de chuvas prolongadas e, tem início quando a capacidade de infiltração do solo é excedida (GUERRA, 1998).

Apesar da existência do termo "laminar" na literatura, deve-se considerar que para este tipo de processo não ocorre à formação de uma lâmina de água sobre a encosta, uma vez que não há uma quantidade de água necessária para tal condição, sendo assim, para muitos autores o termo mais adequado para caracterizar este tipo de processo, consiste em erosão "intersulcos".

Segundo Vilar e Prandi (1993) o termo intersulcos é utilizado para descrever os processos resultantes da formação de um fluxo praticamente uniforme na superfície do solo, devido principalmente a ação da gota da chuva. Este processo é desencadeado pelo escoamento superficial, que propicia o transporte das partículas erodidas.

Para avaliar a perda média de solos por erosão laminar, a partir de um modelo empírico, considerando aspectos ambientais e de manejo do solo, Wishmeier e Smith (1978) propuseram a EUPS (Equação Universal de Perda de Solo) descrita na Equação 1

$$A = R. K. L. S. C. P \tag{1}$$

Onde:

- A = índice que representa a perda de solo por unidade de área;
- R = índice de erosividade da chuva;

- K = índice de erodibilidade;
- L = índice relativo ao comprimento da encosta;
- S = índice relativo à declividade da encosta;
- C = índice relacionado ao fator de uso e manejo do solo;
- P = prática conservacionista adotada.

2.2.3.2 Erosão linear

A erosão linear ocorre devido à concentração do fluxo das águas proveniente do escoamento superficial, que ocasionam a formação de feições erosivas como sulcos e ravinas. Este tipo de erosão pode ocorrer também devido ao fluxo de água subsuperficial e acarretar a formação das voçorocas ou boçorocas (SALOMÃO; IWASA, 1995).

- Sulcos

Neste tipo de feição erosiva a concentração do fluxo ocorre apenas em alguns pontos do terreno, ocasionando pequenas incisões, que possuem até 0,5 m de profundidade e são perpendiculares às curvas de nível (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; SANTORO, 2009). Segundo Morgan (1986), os sulcos são caracterizados pelas feições que podem ser recuperadas com operações normais, como o preparo do solo; e estão associadas às trilhas de gados e geralmente ocorrem em locais onde há movimentação de terra. A Figura 3 apresenta um exemplo de feição do tipo, localizada da região de São Pedro (SP).

Figura 3 - Sulco localizado em São Pedro - SP.



Fonte: Araújo (2011).

- Ravinas

A formação das ravinas ocorre em função do aumento da velocidade do fluxo, que por sua vez está relacionado com o aumento da intensidade da chuva, do gradiente da encosta ou também quando a capacidade de armazenamento de água no solo é excedida. As ravinas são feições com características efêmeras, descontínuas e se originam após um evento chuvoso. No entanto, novos eventos podem ocasionar o surgimento de novas feições, que não apresentam relação com aquelas existentes. Estas feições têm sua origem relacionada com o desmatamento e uso intensivo de terras agrícolas, especialmente em períodos de chuvas concentradas, onde o solo permanece desprotegido (GUERRA, 1998). A Figura 4 ilustra uma feição erosiva do tipo ravina localizada no município de São Pedro (SP).

As características do fluxo que originam as ravinas podem ser divididas em quatro estágios: escoamento superficial difuso; escoamento superficial com concentração em pontos preferenciais; escoamento concentrado em microcanais, sem cabeceira definida e escoamento concentrado em microcanais com cabeceiras definidas (MORGAN, 1986).

Figura 4 - Ravina localizada em São Pedro - SP.



Fonte: Araújo (2011).

- Voçorocas

As voçorocas são feições erosivas profundas; de características permanentes; possuem paredes íngremes; geralmente, fundo chato; presença de água no seu interior; e dependendo da profundidade podem atingir o lençol freático. A ocorrência das voçorocas está associada com processos de erosão acelerada, que ocasionam instabilidade da paisagem, e com o alargamento e aprofundamento de ravinas. Atividades como desmatamento, uso agrícola de terra, superpastoreio e queimadas associadas com o tipo de chuva e propriedades do solo podem ocasionar o surgimento destas feições (GUERRA, 1998).

A ocorrência destas feições também pode ter sua origem devido ao escoamento subsuperficial. Assim, de acordo com Salomão e Iwasa (1995), quando os processos erosivos ocorrem devido à ação do escoamento superficial e também do fluxo subsuperficial, às voçorocas podem evoluir por um tipo de processo erosivo denominado erosão interna ou tubular, que originam o *piping*, que promove a retirada de partículas do interior do solo e consequentemente leva a ocorrência de colapsos.

Segundo os autores, as voçorocas se caracterizam pela elevada capacidade de destruição do terreno, uma vez que envolvem em seu processo de evolução, diferentes fenômenos: erosão superficial, erosão interna, escorregamentos, desabamentos e solapamentos. De acordo com Morgan (1986), devido às suas especificidades as voçorocas se caracterizam como um processo erosivo acelerado, que ocasionam processos de instabilidade na paisagem.

A Figura 5 mostra um exemplo de feição erosiva do tipo voçoroca, localizada no município de São Pedro (SP), apesar da grande dimensão a feição mostra tendência de estabilização, devido à presença de vegetação no seu interior.



Figura 5 - Voçoroca localizada em São Pedro - SP.

Fonte: Araújo (2011).

A Tabela 3 apresenta uma síntese das principais características dos tipos de feições erosivas laminares - sulcos, ravinas e voçorocas de acordo com Vandaele et al. (1996).

Erosão laminar e sulcos	Ravinas	Voçorocas
Ocorre em relevos com declive bastante suave (sob a linha de drenagem);	Ocorre em canais de drenagem rasos (à montante desses canais);	Ocorre, geralmente, bem definida em canais de drenagem;
Tamanho variado, mas, normalmente, menor que canais de fluxo	Não possui um tamanho definido, porém, é intermediário entre o sulco	São bem maiores em largura e profundidade em relação aos
concentrado;	e a voçoroca;	sulcos e ravinas;
O padrão de fluxo desenvolve pequenos canais paralelos e desconectados que terminam em canais de fluxo concentrados;	Normalmente apresenta uma forma dendrítica, padrão por onde a água tende a escoar. Esse fluxo é influenciado, geralmente, por feições provenientes de atividades agrícolas;	Apresenta um padrão dendrítico por cursos naturais de escoamento. Pode ocorrer também em divisões de canais e em diques de estradas;
Os cortes transversais dos sulcos, geralmente, são estreitos e poucos profundos;	Os cortes transversais são geralmente mais largos e pouco profundos. Suas paredes laterais não são muito bem definidas;	Os cortes transversais são geralmente mais estreitos em relação à profundidade. Suas paredes são bastante íngremes;
Sulcos removidos pela agricultura, normalmente não voltam a aparecer no mesmo lugar;	Feições temporárias, pois podem ser removidas e/ou recuperadas, por algum tipo de cultivo de terra;	Não é removida por quaisquer tipos de cultivo de terra;
Baixa taxa de erosão, dificilmente visível;	Podem ou não ser visíveis;	Erosão facilmente reconhecida e visível, devido suas grandes proporções;
Separação e transporte por gotas de chuva e fluxo superficial, respectivamente;	Separação e transporte por fluxo superficial;	Destacamento e transporte por fluxo superficial, com quedas de bancos instáveis nos canais e alargamento da cabeceira;

Tabela 3 - Características das feições erosivas.

Fonte: Adaptado de Vandaele et al. (1996).

2.2.4 Fatores condicionantes

A ocorrência dos processos erosivos está relacionada com a atuação de forças ativas (características da chuva; declividade; comprimento de rampa e capacidade do solo de absorver água) e forças passivas (resistência do solo à ação erosiva e cobertura vegetal) (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Para Pejon (1992), o surgimento das erosões depende de vários fatores naturais, que combinados com a ação antrópica se intensificam. Os fatores naturais citados pelo autor são: clima, geomorfologia, natureza do terreno (tipo de solo e substrato rochoso) e cobertura vegetal.

É importante destacar que, segundo Vilar e Prandi (1993), no estado de São Paulo, área de estudo desta pesquisa, os processos erosivos estão associados com a ocupação desordenada do meio físico, a concentração de chuvas em determinadas épocas do ano, as formações arenosas presentes em diversas áreas e também devido ao manejo inadequado de áreas agrícolas e obras de engenharia como estradas, loteamentos e expansões urbanas. Dentre todos os fatores climáticos, o mais importante é a precipitação. De maneira geral a ação da chuva se deve ao impacto das gotas sobre o solo que favorecem a erosão, pois causam o desprendimento e transporte das partículas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

De acordo com Salomão e Iwasa (1995), a chuva possui capacidade de causar erosão devido ao impacto das gotas sobre a superfície do solo, e também devido à enxurrada que é formada. Assim, sua ação depende da velocidade e energia que cai sobre o solo, que por sua vez, estão relacionadas com a distribuição pluviométrica e intensidade. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990), a gota da chuva, contribui para a ocorrência dos processos erosivos de três maneiras: desagregando as partículas do solo; devido ao salpicamento, transportando as partículas; e conferindo energia ao escoamento superficial.

A intensidade é o fator pluviométrico de maior importância para a ocorrência dos processos erosivos, e influem diretamente no volume e velocidade da enxurrada. É fundamental que os dados pluviométricos sejam analisados com base nas características de intensidade, duração e frequência. A intensidade se caracteriza como o fator mais importante; a duração de um evento pluviométrico condiciona os mecanismos de infiltração e a formação das enxurradas; e a frequência, assim como a intensidade, influência nas taxas de perda de solo, no teor de umidade e consequentemente no volume das enxurradas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Segundo os autores citados para analisar a energia cinética da chuva, ou seja, a força com que uma partícula golpeia o solo pode-se utilizar a Equação 2, proposta por Wilkinson (1975).

$$Ec = (12,14 + 8,88 \log I_{30}) x P$$
⁽²⁾

Onde:

- $E_c = energia cinética total da chuva (MJ ha⁻¹ mm⁻¹);$
- I_c = intensidade máxima da chuva em 30 minutos (mm h⁻¹);
- P = precipitação total da chuva (mm).
Para expressar a capacidade que a chuva possui de causar a erosão, utiliza-se o índice denominado erosividade, que de acordo com Lal (1994), consiste na capacidade de um agente, como a chuva, causar desagregação e transporte das partículas do solo. Para esse

autor, esta capacidade está relacionada com a taxa de distribuição da chuva e ao tamanho da gota, que conferem energia para ocorrer à erosão.

Desta maneira, correlacionando intensidade e energia cinética pode-se determinar o índice de erosividade da chuva (EI), descrito na Equação 3, a partir da metodologia de Wischmeier e Smith (1958):

$$EI_{30} = EC \ x \ I_{30} \tag{3}$$

Onde:

- $EI_{30} =$ indice erosivo da chuva (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹);
- EC = energia cinética total da chuva (MJ ha⁻¹ mm⁻¹);
- I_c = intensidade máxima da chuva em 30 minutos (mm h⁻¹).

2.2.4.2 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal é a principal proteção do solo contra os processos erosivos, sendo que Bertoni e Lombardi Neto (1990) citam os benefícios proporcionados pela vegetação: proteção contra o impacto da gota da chuva; interceptação e evaporação da gota; aumentam a taxa de infiltração pela ação das raízes; a presença da matéria orgânica melhora a estrutura do solo, aumentando a sua capacidade de retenção de água; reduz a velocidade do escoamento da enxurrada. Vilar e Prandi (1993) afirmam, também, que a presença da vegetação proporciona um aumento da resistência do solo e favorecem a formação de agregados mais estáveis.

2.2.4.3 Fatores topográficos

É representado pela declividade, comprimento de rampa e forma das encostas, que interferem diretamente na velocidade do escoamento superficial (VILAR; PRANDI, 1993). Segundo Pejon (1992), o fenômeno da erosão está relacionado com um conjunto de fatores combinados, dentre eles a declividade é um dos mais importantes na análise do processo de escoamento superficial, bem como na avaliação da suscetibilidade do terreno a erosão.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1990), o comprimento de rampa, interfere no volume e velocidade do escoamento superficial, consequentemente interfere na energia resultante, que ocasiona maior ou menor formação de feições erosivas.

Ruhe (1975) propõem uma classificação das encostas em relação a inclinação, comprimento e largura do declive, sendo linear (L), côncava (C) e convexa (V). A partir desta classificação podem ser definidos nove tipos de formas geométricas, divididos em três grupos (Figura 6). Cada um destes tipos de encostas interfere de maneira distinta na ocorrência dos processos erosivos e consequentemente na formação de diferentes condições de concentração de fluxo de água.



Figura 6 - Classificação das encostas proposta por Ruhe (1975).

Fonte: Adaptado de XuJiongxin, 1996.

Vilar (1989), ao propor um modelo matemático para representação da erosão causada pela água da chuva, verificou que as taxas de solo erodido, estão condicionadas a forma da encosta, assim, na encosta convexa a perda de solo é mais acentuada, seguida pelas encostas retilíneas, convexo-côncava e côncava.

2.2.4.4 Solos

As características físicas, químicas e biológicas do solo exercem diferentes influências nos processos erosivos. Estas propriedades conferem resistência ao solo e determinam um comportamento diferente frente a condições semelhantes. De acordo com Vilar e Prandi (1993), a natureza do solo é um fator fundamental para ocorrência dos processos erosivos, as

suas características hidrológicas determinam as taxas de infiltração e as hidráulicas as variáveis do fluxo.

Conforme Salomão e Iwasa (1995), as propriedades do solo que conferem maior ou menor resistência em relação à ação das águas, são: textura, estrutura, permeabilidade, densidade, bem como as características químicas, biológicas e mineralógicas (Tabela 4).

Propriedades	Características
Tortura	 Está relacionada com a capacidade de infiltração e absorção da água da chuva;
Техниги	 Interfere no fluxo do escoamento superficial.
	Como a textura, influencia na capacidade de infiltração e absorção da água, e também
Fstrutura	na capacidade de arraste das partículas do solo;
Estrutura	Solos com estrutura microagregada apresentam alta permeabilidade e maior resistência
	ao arraste de partículas pela ação da água da chuva.
Downoabilidado	Está relacionada com a porosidade do solo e, portanto, determina a capacidade de
rermeabiliadae	infiltração em relação à água da chuva.
Dansidada	• É uma propriedade inversamente proporcional à porosidade e permeabilidade do solo;
Densidude	 A compactação do solo tende a reduzir os macro-poros e torná-lo mais erodível.
Químicas e	Está relacionada com o estado de agregação das partículas, conferindo maior ou
mineralógicas	menor resistência do solo à erosão.
	Favorece o estado de agregação das partículas e influencia na coesão existente entre
Matéria	as partículas;
Orgânica	 Influencia na estabilidade do solo em relação à presença de água, conferindo maior ou
	menor capacidade de retenção.
	 Interfere na capacidade de infiltração, favorecendo ou não a formação de enxurradas;
Espessura	A gradiência textural entre os horizontes confere maior ou menor suscetibilidade a
	erosão.

Tabela 4 - Características dos solos que interferem nos processos erosivos.

Fonte: Adaptado de Salomão e Iwasa (1995).

Outro fator de fundamental importância é a erodibilidade dos solos, que segundo Lal (1994) consiste na suscetibilidade do solo quanto à desagregação e transporte das partículas e, está relacionada com a textura, estrutura, matéria orgânica, mineralogia das argilas e composição química.

Segundo Vilar e Prandi (1993), a erodibilidade dos solos indica a maior ou menor aptidão das partículas resistirem aos esforços causados pelos agentes condicionantes dos processos erosivos, e por isso, está intimamente relacionada com a resistência do solo, que pode ser comprometida pelos ciclos de umedecimento e secagem e também pela concentração de eletrólitos.

De acordo com Zuquette et al. (2007), diversos métodos têm sido utilizados na avaliação da erodibilidade dos solos, e podem ser divididos em diretos e indiretos (Tabela 5).

Método	Ensaio	Autor
	Estimativa do Fator K(_{EUPS})	Wishmeier et al. (1971)
Indiretos	Método MCT (Miniatura compactada tropical)	Vertamatti e Araujo (1990)
	Índice Bouyoucos	Morgan (1986)
	Ensaio de Inderbitzen	Inderbitzen (1961)
	Índice de erodibilidade (E=52S/P)*	Nogami e Villibor (1979)
Diretos	Índice de erodibilidade (E = $40S/P$)*	Pejon (1992)
	Ensaio de Pinhole	Sherad et al. (1976)
	Ensaio com o cilindro rotatório	Moore eMasch Jr (1962)

Tabela 5 - Exemplos de ensaios para avaliação da erodibilidade dos solos.

(*) S: índice de absorção de água; P: perda de água por imersão. Fonte: Adaptado de Zuquette et al. (2007).

Segundo Fendrich et al. (1997), os solos mais propícios à formação das voçorocas são essencialmente arenosos, pouco coesivos, coluviais e porosos. Estes solos geralmente apresentam o horizonte A constituído por areia muito fina, siltosa e pouco argilosa, e o horizonte B composto por camadas de arenito mais resistentes, e camadas de argilas estratificadas.

Em relação à presença de argilas, segundo Vilar e Prandi (1993), estas podem favorecer a ocorrência de erosões, uma vez que ciclos de umedecimento e secagem, em conjunto com variações nas temperaturas, induzem a expansão e retração dos argilo-minerais, este processo independe da ação da chuva e ocorre em solos saprolíticos.

Além dos solos, é importante destacar o papel do substrato rochoso, conforme Infanti Jr. e Fornassari Filho (1998) as características litológicas associadas ao processo de intemperismo, em conjunto com a natureza da alteração e o grau de fraturamento da rocha, indicam sua influência na suscetibilidade à erosão.

2.2.4.5 Ação Antrópica

Além destes condicionantes naturais, Fendrich et al. (1997); Pejon (1992); Santoro (2009) e outros autores descrevem a ação antrópica como um fator que favorece a ocorrência de erosões aceleradas. Algumas das formas de intervenção humana no processo natural são: remoção da cobertura vegetal; agricultura com manejo inadequado; formação de pastos com alta densidade de animais; aberturas de valetas perpendiculares às curvas de nível; abertura de estradas sem a execução de obras de drenagem e execução de loteamentos sem controle do uso do solo.

A Tabela 6 apresenta diversos aspectos relacionados com os agentes deflagradores dos processos erosivos, compilados por Dantas-Ferreira (2004) a partir de diversos autores.

Tabela 6 - Agentes deflagradores dos processos erosivos

Fatores	Características
1 4101 05	 Um dos fatores climáticos de major importância na erosão dos solos:
	 O volume e a velocidade da envurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva;
	 A intensidade é o fator pluviométrico mais importante na erosão:
	Em regiões tropicais, o efeito de degradação pelo clima está aliada à chuva e sua capacidade de
	causar erosão:
	 São considerados deis agentes aresivas distintos a gote de abuve o esseemente superficiel;
Chang	 Sao considerados dois agentes erosivos distintos, a gota de cintiva e o escoamento superficial, A evolução do processo erosivo está ligada à guentidada da água evolução asecoa pa
Cnuva	 A evolução do processo erosivo está ligada a quantidade de água excedente que escoa na encosta:
	 Os processos erosivos são mais atuantes e energéticos nos períodos mais chuvosos e, por isso, é
	importante estabelecer os índices pluviométricos;
	A infiltração e o escoamento superficial são dois processos formados a partir da precipitação
	pluviométrica e do impacto da gota de chuva, estes contribuem para o desenvolvimento de uma
	feição erosiva;
	Agentes geomorfológicos desencadeares na formação de voçorocas deve ser considerada em
	escala maior: as características típicas das encostas e suas feições particulares e em escala
	menor: processos de modelado cujos últimos eventos refletem a cobertura vegetal;
Topografia	A influência da topografia do terreno na intensidade erosiva manifesta-se principalmente pela
	declividade e comprimento da rampa (comprimento da encosta);
	Se a declividade aumenta quatro vezes, a velocidade de escoamento aumenta duas vezes e a
	capacidade erosiva quadruplica;
	• O solo tem um papel essencial nos estudos sobre os mecanismos do processo erosivo, devido
	suas características e interação com os outros fatores;
	 A degradação das propriedades físicas do solo é um dos principais processos responsáveis pela
Natureza	perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica;
do Solo	As propriedades do solo que afetam a erosão são: textura, estrutura, densidade aparente,
	permeabilidade e teor de matéria orgânica;
	As propriedades dos solos exercem diferentes influências na erosão, ao conferir maior ou menor
	resistência à ação das águas;
	 A vegetação desempenha um papel importante, pois promove uma distribuição mais difusa da
	água de escoamento pluvial, dificultando a instalação da erosão;
Cobertura	Em terrenos descobertos, a enxurrada faz desprender e salpicar as partículas de solo, que são
Vegetal	facilmente transportadas pela água;
	 Ao decompor-se, aumenta o conteúdo de matéria orgânica e de húmus do solo, melhorando-lhe a
	porosidade e a capacidade de retenção da água;
	 É o principal fator na deflagração dos processos erosivos;
	 A intervenção humana no meio, com o desmatamento, seguido ou não de exploração econômica,
	implantação de obras civis e/ou núcleos urbano altera sua estabilidade;
Ação	 A readaptação à nova condição se manifesta na força de intensificação dos processos erosivos;
Antrópica	• A modificação das encostas provocam alterações significativas na relação escoamento
	superficial/armazenamento hídrico do solo, provocando alterações na bacia;
	 As seguintes atividades influenciam no desencadeamento dos processos erosivos: ocupação
	desordenada das encostas e fundo de vales, construção de barragens e desmatamentos.

Fonte: Dantas-Ferreira, 2004.

2.3 Avaliação dos processos erosivos

A avaliação da erosão hídrica deve ter como base a definição dos fatores que condicionam a erosão, para isto, são utilizadas técnicas de levantamento em campo, ensaios e análises que permitam o estabelecimento das relações existentes entre estes fatores. As análises também podem incluir a avaliação espacial e temporal, com a finalidade de identificar as variáveis de causa e efeito, favorecendo a elaboração de equações que descrevam os processos que intervém na ocorrência das erosões (ALMOROX et al., 2010).

Neste contexto, o autor citado propõe dois métodos de avaliação da erosão (Figura 7). A avaliação qualitativa é realizada com base na forma e grau da erosão e a avaliação quantitativa considera as características pertinentes deste fenômeno. Dentre estes métodos, destaca-se a avaliação quantitativa que permite a representação numérica do processo, com base em parâmetros de ensaios, e também a avaliação por meio de modelos físicos, estatísticos e paramétricos.





Fonte: Almorox et al. (2010).

2.3.1 Modelos estatísticos, físicos e paramétricos

Segundo Almorox et al. (2010), os modelos físicos permitem a compreensão dos mecanismos da erosão com base nas leis da física, que governam a geração e transporte dos sedimentos; os modelos conceituais permitem a representação dos diversos processos, como geração, transferência e armazenamento a partir de modelos hidrológicos; os modelos paramétricos associam os fatores de causa e efeito com formulações empíricas; e os modelos estatísticos relacionam as medidas de degradação com parâmetros relacionados aos processos

erosivos, como clima e relevo. A Tabela 7 apresenta exemplos de modelos que podem ser aplicados na avaliação indireta.

Tipo	Autor	Modelo
Danam átviana	Wischmeier e Smith (1978)	USLE
Furumetricos	AutorWischmeier e Smith (1978)Renard et al. (1997)Young et al. (1989)Wilkinson (2004)Neitsch (2004)Beasley (1977)Schmidt et al. (1999)Morgan et al. (1998)Rose et al. (1997)Smith et al. (1997)Smith et al. (1995)De Roo (1996)Nunes (2005)Kirkby et al. (2004)Morgomery e Dietrich (1994)O'Loughlin (1986)	RUSLE
	Young et al. (1989)	AGNPS (Agricultural Now-Point Source)
Conceituais	Wilkinson (2004)	SEDNET
	Neitsch (2004)	SWAT (Soil and water assessment tool)
Beasley (1977)	Pagelay (1077)	ANSWERS (Areal Non-Point Source Watershed
	Beasley (1977)	Environment Response Simulation)
	Schmidt et al. (1999)	EROSION-3D
	Morgan et al. (1998)	EUROSEN (Europen Soil Erosion Model)
	Rose et al. (1997)	GUEST (Griffith University Erosion System Template)
Dana Eźsian	Smith et al. (1995)	KINEROS (Kinematic Erosion Simulation)
Base Fisica	De Roo (1996)	LISEM (Limburg Soil Erosion Model)
	Nunes (2005)	MEFIDIS (Modelo de erosão físico distribuído)
	Kirkby et al. (2004)	PESERA (Pan-Europen Soil Erosion Risk Assessment)
	Montgomery e Dietrich (1994)	SHALSTAB
	O'Loughlin (1986)	TOPOG
	Laflen et al. (1991)	WEPP (Water Erosion Prediction Project)

Tabela 7 - Modelos de avaliação quantitativa indireta das erosões.

Fonte: Almorox et al. (2010); Furegatti (2012).

Dentre os modelos paramétricos, de predição da erosão hídrica, os métodos baseados na Equação Universal de Perda de Solos (USLE) são os mais conhecidos, pois se caracteriza como um método simples para previsão de perda de solo. A partir da aplicação da USLE pode-se prever as perdas anuais de solo; as alterações nas perdas ocasionadas por mudanças nas práticas de cultivo; propor práticas conservacionistas conforme a previsão da perda de solo, entre outras aplicações (RANIERI, 1996).

Em relação aos modelos conceituais, Furegatti (2012) cita que são necessárias informações detalhadas da bacia para realização da descrição dos processos a serem analisados. Dentre os modelos citados o SWAT é aplicado em escala de bacia ou sub-bacia hidrográfica, mas não considera erosões lineares, diferente do AGNPS que pode ser aplicado para análise de erosões do tipo ravinas (efêmeras ou pertinentes).

Segundo a autora citada, os modelos de base física podem ser subdivididos em três grupos com base no evento de chuva, na sua continuidade e distribuição espacial. Quanto às características dos processos erosivos analisados, ressalta-se que poucos consideram a perda de solo por erosão linear. Os modelos que consideram erosão linear do tipo sulco são: ANSWERS, EUROSEN, GUEST, LISEN, MEFIDIS e WEPP, destes, apenas o ASWERS considera os efeitos da voçoroca para distinguir a quantidade de sedimento.

Os parâmetros de entrada destes modelos são obtidos a partir de ensaios de campo; laboratório; cartas topográficas e geológicas e interpretação de fotos aéreas. Os ensaios específicos utilizados para obtenção destes parâmetros são: simulador de chuva; resistência do solo à penetração e ensaio de infiltração com duplo anel. Os dados obtidos são inseridos nos programas através de banco de dados ou arquivos matriciais, no formato *raster*. Por fim, em relação à escala deve-se considerar o nível de detalhamento de cada modelo (FUREGATTI, 2012).

No entanto, como citado por Kuwajima (2012), muitos destes modelos foram projetados para simular erosões que ocorrem em regiões, com clima e pedologia diferente dos países tropicais. Assim sendo, torna-se fundamental a modificação dos parâmetros e equações para que a simulação esteja em conformidade com as características reais da área; a criação de um banco de dados de solo, manejo de culturas e uso e ocupação, específicos para regiões tropicais. A qualidade e disponibilidade destes dados se refletem de maneira significativa na operação e calibração do modelo.

Apesar de todas as limitações referentes aos parâmetros de entrada, o autor, verificou que modelos de base física, como o SWAT, são eficazes na avaliação da produção de sedimentos e por isso, são ferramentas fundamentais para o desenvolvimento de estudos hidrossedimentológicos, que tem por objetivo o monitoramento do assoreamento em corpos d'água e barragens.

2.4 Índices que relacionam área de contribuição x declividade

O surgimento das feições erosivas está relacionado com diversos fatores naturais, como chuva, solo, substrato rochoso, relevo, e cobertura vegetal. Além destes fatores, existe uma condição morfométrica, determinada em função da relação entre área de contribuição e declividade, que influencia o desencadeamento das feições lineares.

Patton e Schumm (1975) foram os primeiros autores na literatura a estabelecerem uma correlação entre o surgimento das erosões e características morfométricas, a partir de uma relação de potência entre área da bacia de drenagem (A) e declividade crítica (S). Considerando esta relação os autores analisaram o limiar crítico de feições erosivas do tipo

linear e laminar, localizadas no Colorado. A Figura 8 apresenta o gráfico obtido por estes autores.



Figura 8 - Gráfico SxA para erosões laminares (Colorado).

Fonte: Adaptado de Patton e Schumm (1975).

A partir desta relação Begim e Schumm (1979) e Montgomery e Dietrich (1994) propuseram as primeiras equações para representar o limiar crítico de desencadeamento das erosões, levando em consideração o princípio de Horton (1945), que afirma que o surgimento dos canais ocorre quando a tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento superficial excede o limiar de resistência do solo. No âmbito da geomorfologia este conceito é aplicado pressupondo que existe uma relação entre declividade (S) e área de drenagem (A), que condiciona o escoamento superficial necessário para dar início à erosão. Esta relação é expressa pela Equação 4, onde a e -b são coeficientes, que indicam a posição e inclinação da reta, e dependem das características do ambiente.

$$S = aA^{-b} \tag{4}$$

Os parâmetros área de contribuição e declividade podem ser obtidos por diferentes métodos, como: levantamento de campo, fotografia aérea, mapa topográfico, modelo digital de elevação e também por meio do processamento automático em SIG. A Tabela 8 apresenta um levantamento realizado por Vandaele et al. (1996) e a relação dos diferentes métodos que podem ser utilizados.

Autores	Área de estudo	Método	Declividade	Área de drenagem	Processo analisado
Patton e Schumm (1975)	Colorado	Fotografia aérea	Mapa topográfico (1:50.000)	Mapa topográfico	Canais descontínuos
I.G.N. (1983)	França	Fotografia aérea	Mapa topográfico (1:10.000)	Mapa topográfico	Ravinas

Tabela 8 - Métodos e fontes de informação utilizadas (Continua).

Autores	Área de estudo	Método	Declividade	Área de drenagem	Processo analisado
Montgomery e Dietrich (1988)	Califórnia e Oregon	Trabalho de campo	Mensuração em campo	Mapa planialtimétrico	Deslizamento e esocoamento superficial
Vandaele et al. (1995)	Bélgica	Fotografia aérea	Mapa topográfico (1:10.000)	SIG	Ravinas
Poesen et al. (1995)	Bélgica	Trabalho de campo	Mensuração em campo	Mensuração em campo	Ravinas
Vandaele et al. (1995)	Portugal	Fotografia aérea	Mapa topográfico (1:10.000)	SIG	Ravinas
T		1 (100 ()			

Fonte: Adaptado de Vandaele et al. (1996).

Dentre estes métodos destaca-se a aplicação do SIG no trabalho de Vandaele et al. (1995) que calcularam a área de drenagem e declividade com base no modelo digital de elevação, utilizando algoritmos propostos por outros autores.

A partir da relação estabelecida por Patton e Schumm (1975) diversos estudos foram desenvolvidos: Montgomery e Dietrich (1994); Vanwalleghem et al. (2005); e Menéndez-Duarte et al. (2007), entre outros. A Tabela 9 apresenta a relação com alguns destes estudos levantadas por Torri e Poesen (2014) juntamente com o trabalho de Stabile (2015) realiado no Brasil em 2015. Verifica-se que os valores de 'a' e -'b' variam em função das características locais, que são determinadas em função do tipo e cobertura vegetal, clima, substrato rochoso, entre outras.

Autores	Local	а	- <i>b</i>
Patton e Schumm (1975)	EUA	0,16	0,26
Schumm et al. (1980)	EUA	0,008	0,26
Montgomery e Dietrch (1988)	EUA	0,25	0,4
Montgomery e Dietrch (1994)	EUA (Nevada)	0,09	0,50
Montgomery e Dietrch (1994)	EUA (Califórnia)	0,18	0,50
Vandaele et al. (1996)	Bélgica	0,08	0,40
Vandaele et al. (1996)	Portugal	0,02	0,35
Vanderkerckhove et al. (1998)	Espanha	0,157	0,133
Vanderkerckhove et al. (1998)	Portugal	0,102	0,226
Vandekerckhove et al. (2000)	Espanha	0,23	0,10
Nachtergaele et al. (2001)	Bélgica	0,03	0,38
Vanwallmeghem et al. $(2005)^*$	Bélgica	0,0578	0,152
Menendez-Duarte et al. (2007) [*]	Espanha	0,46	0,18
Knapen e Poesen (2010)	Bélgica	0,05	0,40
Araújo (2011) [*]	Brasil	0,02	0,38
Stabile (2015)	Brasil	0,064	0,084
(*) Os valores de Menéndez-Duarte et al. (2007) e Araújo (2011) referem-se	aos canais profundos		•

Tabela 9 - Autores, locais e coeficientes $a \in -b$.

te et al. (2007) e Araújo (2011) referem-se aos canais profundos.

Fonte: Adaptado de Torri e Poesen (2014).

Ao propor um limiar a partir de desencadeamento das erosões deve-se considerar que existem diversos fatores que influenciam nos valores de "a" e "-b" e, consequentemente, na correlação entre os parâmetros A e S. Desta forma, várias considerações foram propostas pelos autores para melhorar o ajuste destes dados, dentre estes trabalhos cita-se o de Vanderkerckhove et al. (1998), que analisaram o limiar de desencadeamento para feições erosivas localizadas no sudeste da Espanha e no nordeste de Portugal. Os autores constataram que ao analisar as feições considerando características especificas como localização topográfica: vales (*hollows*) e encostas planas (*straight slope*), e direção das culturas agrícolas (perpendicular, paralela e direções combinadas) pode-se obter melhores resultados, quanto à correlação entre os parâmetros A e S. Isto ocorre porque tais aspectos influenciam nos mecanismos de escoamento superficial que propiciam o surgimento das feições, além disso, os melhores ajustes se refletem nos canais onde há concentração de fluxo.

Outra consideração importante foi observada no trabalho de Vanderkerckhove et al. (2000), que consideram que além das características de localização das feições e, tipo de cobertura vegetal, deve-se ponderar as questões relativas as características do solo, que influenciam nos mecanismos de escoamento superficial e subsuperficial. Estas características se refletem significativamente nos valores de declividade, que por sua vez condicionam diferentes tipos de processos geomorfológicos, como erosão hídrica e movimentos de massa (Figura 9).





Fonte: Adaptado de Vandekerckhove et al. (2000).

A análise dos limiares também pode ser realizada considerando a profundidade dos canais, como exemplo, cita-se o trabalho de Vanwallmeghem et al. (2005), desenvolvido na Bélgica. Por meio de levantamento de campo foram obtidas informações de comprimento, largura e profundidade das feições, e também os parâmetros área de contribuição e declividade das cabeceiras. Os limiares topográficos foram definidos para canais rasos (<0,8m) e canais profundos (>0,8m), conforme apresentado na Figura 10, observa-se que a diferença entre a posição dos limiares evidencia claramente que, o surgimento dos canais rasos e profundos ocorre em posições distintas da paisagem.







Menéndez-Duarte et al. (2007), também analisaram o limiar de desencadeamento das erosões considerando canais rasos (<1 m) e profundos (>1m), localizados na Espanha. Para mapeamento destas feições foram utilizadas fotografias aéreas e levantamento de campo. Os resultados obtidos a partir da relação SxA mostraram que considerando uma área de 15 ha, a declividade necessária para o desencadeamento dos canais profundos é de 15,8°, e para os canais rasos 9,8°. Com base nas análises realizadas e na comparação com outros trabalhos, os autores concluíram que a declividade é o principal parâmetro morfométrico na determinação do limiar de desencadeamento das erosões. Portanto, devem ser utilizados parâmetros de entrada consistentes, que permitam a representação adequada dos processos analisados.

A elaboração do limiar de desencadeamento das erosões deve ser realizada considerando a localização das cabeceiras das feições, que por sua vez, se refletem nos

parâmetros morfométricos. Segundo Montgomery e Dietrich (1994) o tamanho da área de contribuição tende a sofrer modificações devido às condições climáticas e a migração da cabeceira ao longo da encosta.

Gutiérrez et al. (2009) avaliaram por meio de ortofotos de diferentes datas (1945, 1956, 1989, 1998, 2002 e 2006) o avanço das cabeceiras das feições, e a partir destes dados determinaram os índices SxA. Os autores observaram que as mudanças em termos de área das feições ocorrem em função das mudanças do uso e ocupação e também da remoção da cobertura vegetal. Em relação aos coeficientes do índice, "*a*" e "-*b*" as maiores variações foram no "a", que refletem as mudanças de uso e apresenta relação direta com as características do ambiente, como precipitação, solo e vegetação.

Destaca-se que, com base nas equações SxA obtidas, os autores citados elaboraram o mapa de áreas críticas em SIG, que representa a relação matricial entre o mapa de declividade e de área de drenagem. A Figura 11 apresenta o mapa para uma área da bacia de Parapuños, localizada na Espanha, e a equação utilizada para definição destas áreas. Estes mapas auxiliam a compreensão dos processos de evolução das feições e podem ser aplicados em conjunto com as técnicas de conservação do solo (GUTIÉRREZ et al., 2009)





Fonte: Adaptado de Gutiérrez et al. (2009).

Nazari Samani et al. (2009) fizeram duas análises importantes, a primeira delas foi estabelecer o limiar crítico considerando os processos que condicionam o surgimento dos canais, como escoamento superficial; e a segunda compreendeu a análise dos limiares com base no método utilizado para obtenção dos parâmetros A e S.

Assim como outros autores, Nazari Samani et al. (2009) verificaram que a análise integrada dos dados não favorece o ajuste dos parâmetros A e S, sendo, portanto, necessário

considerar os fatores associados ao aparecimento das feições. Quanto ao método utilizado os limiares obtidos são semelhantes, portanto, quando não existe a possibilidade de realização de levantamento de campo a utilização de dados espaciais é uma alternativa eficaz. No entanto, a confiabilidade dos resultados depende da acurácia do modelo digital de elevação. A Figura 12 apresenta os dados obtidos pelos autores.



Figura 12 - Gráficos SxA para diferentes método de obtenção dos parâmetros.



No Brasil, destaca-se o trabalho de Araújo (2011), realizado na região de São Pedro -SP, que propôs dois índices (I e II) considerando o estágio inicial das feições. O índice I é referente às cabeceiras das erosões identificadas por fotografia aérea, onde os canais analisados foram divididos em rasos (<1m) e profundos (>1m). No índice II, as áreas das cabeceiras das feições foram obtidas por fotografia aérea ortorretificada, em escala de 1:30.000, portanto neste índice foram consideradas apenas os canais profundos.

A Figura 13 apresenta o gráfico e os respectivos índices. Para o Índice I, adotando-se uma área de contribuição de 1000 m², a declividade crítica para desencadeamento de erosões em canal raso foi de 3,55 % e para canais profundos 5,2 %. Todavia para o Índice II, considerando apenas as erosões de grandes portes, para uma área de 1000 m², a declividade crítica foi de 14%.

Uma observação importante deste trabalho é que as retas que representam o limiar crítico para o desencadeamento das erosões foram obtidas de forma empírica, pois o autor não obteve um bom ajuste matemático dos pontos plotados no gráfico SxA. No entanto, a partir da

validação realizada foi possível constatar que os índices obtidos estão em conformidade com as características da área em estudo e, portanto, estão condizentes com os limiares de desencadeamento das erosões lineares (ARAÚJO, 2011).



Figura 13 - Gráfico SxA para canais localizados na região de São Pedro - SP.

Fonte: Adaptado de Araújo (2011).

Outro trabalho desenvolvido no Brasil foi o de Stabile (2013), que avaliou os limiares críticos para o desencadeamento de erosões lineares localizadas em Piratinga (SP). A mensuração da declividade (S) foi realizada de duas maneiras, em campo utilizando um pantômetro, e através do modelo digital do terreno (MDT), no qual foram obtidas também as áreas de contribuição. Para proposição dos limiares críticos as feições foram divididas em dois grupos, considerando o condicionamento antrópico. A Figura 14 apresenta um dos gráficos obtidos pelo autor.

Em relação à mensuração da declividade o autor concluiu que o método utilizado reflete significativamente nos valores deste parâmetro, desta forma, em função da baixa correlação obtida com os dados coletados em campo, optou-se pela utilização do modelo digital do terreno (10x10 m), pois apresentou melhor precisão.

Quanto à relação entre A e S, constatou que coeficientes "a" e "-b" estão condizentes com os processos analisados, no entanto, a localização de alguns pontos abaixo do limiar crítico indica que o desencadeamento destes canais está relacionado não só com parâmetros

morfométricos, mas também com fatores antrópicos, portanto estas feições não existiriam em condições normais, e por isso sua análise não deve ser fundamentada apenas em aspectos topográficos (STABILE, 2013).





Fonte: Adaptado de Stabile, 2013.

2.4.1 Limiar para representação das áreas instáveis

Considerando a abordagem proposta por Patton e Schumm (1975), Dietrich et al. (1992) e Montgomery e Dietrich (1994), desenvolveram um modelo analítico para representar as áreas de instabilidade na paisagem decorrentes de processos erosivos intensos. O modelo tem como base três equações que descrevem os limiares de saturação do solo; de erosão por escoamento superficial; e deslizamento.

De acordo com Dietrich et al. (1992) o método proposto tem como base os modelos numéricos de evolução da paisagem e as proposições feitas por outros autores como Horton (1945); O'Loughlin (1986); Moore et al. (1988); Beven e Kirbby (1979). Para determinar as equações dos limiares, os autores fizeram algumas considerações: o escoamento subsuperficial é paralelo à superfície da encosta; a condutividade hidráulica, a trasnmissividade e as propriedades que determinam a resistência do solo à erosão são espacialmente constantes.

Desta maneira foram propostas três equações para prever as zonas de saturação na paisagem, considerando características geomorfológicas (declividade e área de contribuição da encosta), natureza do solo e processos hidrológicos, como escoamento superficial hortoniano e escoamento superficial por saturação.

2.4.1.1 Limiar de saturação do solo

Considerando *a* como o índice geomorfológico (área de contribuição por unidade de contorno); R, escoamento lateral subsuperficial do solo saturado; T, transmissividade; e M o gradiente hidráulico, o limiar de saturação do solo, pode ser descrito a partir da Equação 5. Segundo Dietrich et al. (1992) o solo apresenta uma condição saturada quando o valor da área de contribuição for maior ou igual aos parâmetros descritos no lado direito da equação.

$$a \geq \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{R}} \,.\,\mathrm{M} \tag{5}$$

É importante ressaltar que para equacionar este limiar os autores consideraram a definição proposta por O'Loughlin (1986), que estabeleceu um critério para analisar as áreas de saturação a partir do comprimento da área de contorno (Figura 15). Segundo o autor o índice geomorfológico (a) é definido como a relação entre área de contribuição e unidade de contorno.



Figura 15 - Representação do índice geomorfológico.

Fonte: Vestena e Kobiyama (2014).

2.4.1.2 Limiar de erosão por escoamento superficial

Para determinar este limiar Dietrich et al. (1992) utilizaram como base as equações que regem o escoamento superficial hortoniano, como vazão, velocidade do escoamento e tensão crítica.

Os autores verificaram que o inicio dos canais de erosão, especificamente das ravinas, ocorre quando a tensão de cisalhamento crítica é excedida e, que o escoamento superficial por saturação ocorrerá quando o volume de precipitado for maior que a capacidade de infiltração. Desta forma, a área crítica para ocorrência da erosão por escoamento superficial por saturação pode ser definida a partir da Equação 6.

$$a_{cs} = \frac{2 \cdot \tau_c^3}{k \cdot v \cdot \rho_a^3 \cdot g^2 \cdot R \cdot M^2} + \frac{T \cdot M}{R}$$
(6)

Onde:

- a_{cs} = área crítica por unidade de contorno necessária para ocorrência de erosão por escoamento superficial;
- τ_c = tensão de cisalhamento crítica (N/m²);
- k = constante ligada à geometria da superfície (adimensional);
- v = viscosidade cinemática (m²/s);
- $\rho_a = \text{densidade da água (1000kg/m³);}$
- g = aceleração da gravidade (9,8m/s²);
- R = precipitação não interceptada sobre área (m/s);
- M = declividade do terreno (m/m);

2.4.1.3 Limiar de deslizamento

Para determinar a equação que rege o limiar de deslizamento, Dietrich et al. (1992) consideraram dados de vazão, condições de fluxo e condutividade hidráulica, e também os modelos de instabilidade da vertente infinita e hidrologia de vertente. A Equação 7 determina a área crítica para ocorrência de erosões por deslizamentos.

$$a_{cd} = 2\left(1 - \frac{M}{\tan \theta}\right) \cdot \frac{T \cdot M}{R} \tag{7}$$

Onde:

- a_{cd} = área crítica para ocorrência de erosões por deslizamentos;
- $\phi = \hat{a}$ ngulo de atrito (grau);

A partir da teoria dos limiares dos processos erosivos foi possível elaborar um gráfico que representa os limites espaciais entre os diferentes tipos de erosão que podem ocorrer em uma bacia hidrográfica. Desta forma Montgomery e Dietrich (1994) representaram graficamente a relação entre área de contribuição e declividade, considerando os diversos processos hidrológicos que ocorrem na vertente (Figura 16).



Figura 16 - Limiares críticos na paisagem.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Dietrich (1994).

Da junção dos gráficos ilustrados na Figura 16, resulta no gráfico da Figura 17 que relaciona área de drenagem e declividade e os limiares que representam as áreas de instabilidade na paisagem.





Fonte: Adaptado de Montgomery e Dietrich (1994).

O modelo proposto por Montgomery e Dietrich (1994) tem como base a relação entre área de contribuição (A) x declividade (S), no entanto o gráfico proposto por Patton e Schumm (1975) permite a representação apenas do limiar critico que condiciona os processos erosivos, com base nos parâmetros morfométricos. Enquanto que, o gráfico destes autores representa os limiares críticos de três processos distintos, que por sua vez estão relacionados com as zonas instáveis da paisagem, que ocorrem em função de parâmetros geomorfológicos, hidráulicos e geotécnicos.

No Brasil, considerando as equações descritas por Dietrich et al. (1992), Santos (2001) desenvolveu o mapeamento e identificação dos limiares dos processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Pequeno, localizada na região de Curitiba. Correlacionando as equações, parâmetros geotécnicos e hidrológicos do solo e, informações espaciais (índice geomorfológico e declividade), o autor realizou a simulação dos diferentes processos erosivos que ocorrem naquela área.

Grando (2011) também estabeleceu os limiares dos processos erosivos em uma microbacia hidrográfica localizada na região do Planalto Norte do estado de Santa Catarina, utilizando também a metodologia de Montgomery e Dietrich (1994). A autora buscou identificar as alterações que levaram ao desencadeamento dos processos erosivos correlacionando com parâmetros geotécnicos e hídricos do solo.

Outro trabalho desenvolvido neste contexto foi o de Vestena e Kobiyama (2014) que realizaram a identificação e mapeamento dos processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Caeté localizada em Alfredo Wagner - SC. Para determinar espacialmente os diferentes processos os autores consideraram a metodologia proposta por Dietrich et al. (1992) e também elaboraram uma carta de diagnóstico ambiental, correlacionando as formas de uso e ocupação com os processos erosivos.

2.5 Mapeamento geotécnico

O mapeamento geotécnico compreende os processos que visam o levantamento, caracterização, classificação, avaliação e análise de atributos relacionados ao meio físico, como geologia, hidrogeologia, hidrologia, entre outros, que por sua vez, serão manipulados, correlacionados, interpretados e representados em mapas e cartas geotécnicas (ZUQUETTE, 1987).

Segundo Sobreira e Souza (2012), a cartografia geotécnica, como um conjunto de produtos cartográficos que retratam os atributos do meio físico (solos e rochas), deve ter por finalidade a avaliação das limitações e potencialidades de uma determinada área, frente às diferentes formas de ocupação.

A elaboração de mapas de inventário; mapas de suscetibilidade e riscos; mapas para planejamento e uso de solo, deve ter como base o conhecimento de aspectos relacionados ao meio físico. No entanto, a elaboração destes mapas e cartas deve avaliar também a variação destes aspectos com o tempo, onde serão avaliados, por exemplo, a intensidade dos fatores desencadeadores e a interferência antrópica (SOBREIRA, 2004).

Além disso, de acordo com Pejon e Zuquette (1995), a seleção dos atributos a serem utilizados na elaboração de cartas e mapas geotécnicos deve estar intrinsecamente relacionada com a escala de trabalho adotada, considerando principalmente as possíveis inter-relações existentes entre estes dados. Segundo os autores, estas condições determinam a eficiência e qualidade dos produtos cartográficos obtidos.

Conforme citado por Zuquette e Gandolfi (2004) existem diversas metodologias para elaboração de mapas e cartas geotécnicas: IAEG (*International Association of Engineering Geology*); Francesa (SANEJOUAND, 1972); ARDA (Sistema de Geoinformação do Inventário de Terras do Canadá); IG-UFRJ (BARROSO et al., 1993); IPT (PRANDINI et al., 1995); EESC/USP (ZUQUETTE, 1987 e 1993), entre outras.

Dentre estas se destaca a metodologia da EESC/USP (ZUQUETTE, 1987 e 1993) que surgiu em função da necessidade de adaptação às condições socioeconômicas e climáticas do Brasil. O autor propõe que o trabalho seja realizado em três fases: a primeira consiste na definição do problema a ser investigado; a segunda compreende a divisão da área em unidades homogêneas em função das propriedades e das relações entre os atributos; e por fim, se realiza a comprovação da hipótese, por meio de ensaios e tratamento físico. Os documentos cartográficos resultantes desta metodologia podem ser classificados em quatro tipos: mapas básicos fundamentais; mapas básicos opcionais; mapas auxiliares e cartas derivadas ou interpretativas (Figura 18).



Figura 18 - Documentos cartográficos produzidos pelo mapeamento geotécnico.

Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

Diniz (2012) apresenta uma classificação para as cartas geotécnicas segundo sua finalidade: planejamento urbano e regional; avaliação do meio físico; e viabilidade de implantação de projetos de infraestrutura e empreendimentos. Quando a finalidade envolve a avaliação do meio físico, consideram-se neste caso as cartas de suscetibilidades e riscos geológicos existentes como erosão, inundação, escorregamentos, sismos, entre outros.

A carta de potencial à erosão, segundo Pejon e Zuquette (1995), deve ser elaborada a partir da interpretação e sobreposição de planos de informações da área a ser mapeada. Para cada um dos atributos considerados são atribuídos pesos em função de sua importância, resultando em um produto com novos limites redefinidos, indicando as áreas mais ou menos suscetíveis a ocorrência de processos erosivos.

Zuquette (1987) cita os atributos que devem ser considerados em uma carta geotécnica de avaliação dos processos erosivos: natureza dos materiais (propriedades geotécnicas); relevo; cobertura vegetal; fatores climáticos; ação antrópica; e ação da água. Segundo o autor, o produto cartográfico obtido deverá representar à alta, média ou baixa susceptibilidade dos materiais constituintes quanto à ocorrência de processos erosivos.

Gomes (2002) realizou o mapeamento geológico-goetécnico das feições erosivas concentradas na Bacia do Córrego do Meio, na escala de 1:20.000. Os atributos considerados pela autora (Figura 19) foram inicialmente agrupados de maneira hierárquica, atribuindo-se em seguida os respectivos valores conforme o grau de importância de cada um deles. As classes de suscetibilidade estabelecidas foram: muito pouco suscetível; pouco suscetível; moderadamente suscetível; altamente suscetível.



Figura 19 - Atributos do meio físico associados à erosão.

Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

Magri (2013) elaborou a Carta de Suscetibilidade à Erosão da Bacia Hidrográfica do Médio Rio Grande (1:50.000) a partir da interpolação dos seguintes planos de informação: substrato rochoso; formas do terreno; materiais inconsolidados e declividade. Inicialmente, estes dados foram analisados individualmente, avaliando a importância de cada um deles na ocorrência de processos erosivo, em seguida foram analisados em conjunto, através de matrizes de comparação pareada (AHP). As áreas mapeadas pelo autor foram classificadas em muito baixa, baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade à erosão.

Outro exemplo de mapeamento geotécnico, aplicado ao estudo de processos erosivos, foi o trabalho desenvolvido por Zuquette et al. (1995) que realizaram o mapeamento geotécnico da cidade de Franca (SP) na escala de 1:25.000. Utilizando atributos do meio físico como declividade; forma e comprimento da encosta; propriedades geotécnicas dos materiais incosolidados; litologia; profundidade do nível de água; escoamento superficial e inventário de feições erosivas, os autores elaboraram a carta de risco à erosão, que resultou em quatro unidades, com diferentes níveis de risco. A carta geotécnica foi utilizada também para orientar ações de prevenção e recuperação das erosões, orientando desta forma o local para instalação das obras e os processos de ocupação.

Netto e Sobreira (2006) mapearam os processos erosivos lineares na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Carioca e elaboraram o Mapa Cadastral de Processos Erosivos (1:25.000), que representava a distribuição das feições erosivas na área de estudo e sua classificação quanto ao grau de desenvolvimento. Desta maneira, foi possível não só quantificar os processos como também analisar sua distribuição espacial.

2.5 Geoprocessamento como ferramenta de auxílio

O geoprocessamento é uma geotecnologia, que atualmente tem beneficiado diversas pesquisas científicas que envolvem, por exemplo, a avaliação do meio físico, gestão e o planejamento ambiental, e pode ser definido como um conjunto de técnicas, métodos e conceitos, que operam sobre uma base de dados geo-orientados (XAVIER DA SILVA, 2009).

Segundo Rodrigues (1990), o geoprocessamento constitui um conjunto de tecnologias que permitem a aquisição e análise de informações espaciais, onde os resultados obtidos poderão ser aplicados em diversos trabalhos que tenham como escopo à representação espacial de diversos atributos, como por exemplo, dados do meio físico (geologia, hidrologia, entre outros).

Assim, o termo geoprocessamento pode ser definido como a aplicação de técnicas computacionais denominadas Sistema de Informação Geográfica (SIG), para tratamento de informações geográficas, visando à realização de análises complexas, integração de dados; e criação de banco de dados georreferenciado (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

O geoprocessamento tem contribuído fortemente para o desenvolvimento da cartografia geotécnica, principalmente na execução de determinadas atividades como compilação de dados existentes; elaboração do banco de dados; processamento de dados de sensoriamento remoto; manipulação de dados pontuais; modelos numéricos do terreno e cartas (SOUZA; GANDOLFI, 1993).

Câmara e Medeiros (1998) citam alguns exemplos de operações e aplicações do geoprocessamento: classificação de imagens (áreas de floresta); análise espacial e elaboração de carta de declividade (áreas agrícolas); visualização em 3D (análise geológica e geomorfológica); e consulta espacial (estudos urbanos e regionais), entre outros.

Diversos *softwares* de geoprocessamento têm sido utilizados, Celestino e Diniz (1998) citam alguns deles, descritos na Tabela 10.

Software	Тіро	Distribuidor
ArcGIS	SIG	ESRI
IDRISI	SIG	Centro de Recursos Idrisi
MAPINFO	SIG	GEOGRAPH
SPRING	SIG	INPE
AutoCAD MAP	CAD/SIG	GISOFT
ENVI	Processamento de Imagens	SULSOFT
IMAGER	Processamento de Imagens	SISGRAPH
SITIM/SGI	Processamento de Imagens	INPE

Tabela 10 - Softwares de geoprocessamento.

Fonte: Adaptado de Celestino e Diniz (1998).

O ArcGIS desenvolvido pela Esri[®], tem sido bastante utilizado em estudos que visam a análise espacial, especificamente na análise hidrológica; análise geoestatística; processamento de dados georreferenciados; elaboração de produtos cartográficos; composição de banco de dados, entre outros. Este *software* é composto basicamente por três ambientes de trabalho: ArcCatalog utilizado para gerenciar os dados; ArcMap que realiza todas as atividades referentes a manipulação de dados e; ArcToolbox que permite a conversão e aplicação de técnicas de geoprocessamento (MITCHELL, 1999).

2.5.1 Sistema de informação geográfica (SIG)

O SIG é uma ferramenta tecnológica que surgiu recentemente a partir da evolução da engenharia de computação. Esta ferramenta tem auxiliado diversos profissionais que buscam compreender a Terra, em seus diversos sistemas ambientais. Desta forma, o SIG tem sido utilizado em trabalhos de gestão ambiental, avaliação de impacto ambiental, análise de riscos ambientais, atividades de monitoramento entre outros (AUGUSTO FILHO, 2013).

O SIG consiste em um "conjunto composto por computador, programas e dados geográficos com capacidade de capturar, armazenar, atualizar, analisar e apresentar todas as formas de informações geograficamente referenciadas" (ESRI, 1997 apud AUGUSTO FILHO, 2013). A Figura 20 apresenta a arquitetura básica de um SIG.



Figura 20 - Estrutura de um SIG.

Fonte: Adaptado de Câmara e Medeiros (1998).

De acordo com Fitz (2008), o SIG consiste em um conjunto de sistemas associados, compostos por programas com diversos módulos que, por sua vez, podem compor outros sistemas independentes, e possui basicamente quatro funções: aquisição e edição de dados; gerenciamento de banco de dados; análise geográfica e representação de dados.

Existem duas maneiras de representar os dados espaciais no SIG, formato vetorial ou matricial. No vetorial os elementos gráficos são representados por pontos, linhas e polígonos, enquanto que no formato matricial todo o espaço é representado com uma matriz composta por linhas e colunas, onde cada célula possui um valor referente ao atributo analisado, e pode ser acessada a partir de suas coordenadas (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

Segundo Sobreira (2004), a utilização dos sistemas de informações geográficas, advindo da evolução da cartografia, possibilitou o armazenamento, tratamento e análise de um

volume maior de dados, favorecendo a elaboração de cartas de suscetibilidade, vulnerabilidade e avaliação de riscos existentes, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento da cartográfica geotécnica, como um todo.

De acordo com Souza e Celestino (2004), a principal vantagem do SIG consiste na sua capacidade de realizar análises complexas, por meio da integração de dados espaciais em uma única base de dados. Além disso, o uso do SIG permite a manipulação de dados espaciais e a realização de diversas operações matemáticas, desta forma os mapas podem ser elaborados a partir de diversos planos de informação, integrados em uma mesma escala, que por sua vez, vão permitir a elaboração de cartas derivadas.

Celestino e Diniz (1998) citam alguns dos produtos que podem ser obtidos a partir do uso do SIG, no âmbito da geologia de engenharia: cartografia digital; modelagem digital de terrenos; automatização de cartas de declividade; diagnóstico do meio físico; gerenciamento de banco de dados geológico-geotécnico por unidades de terreno, municípios e bacias hidrográficas; avaliação geotécnica com diferentes objetivos; integração de planos de informação para elaboração de zoneamentos ou cartas interpretativas.

2.5.2 Sensoriamento remoto

O termo sensoriamento remoto é utilizado, de forma mais restrita, para designar os métodos eletromagnéticos usados na identificação e caracterização de objetos. Em outras palavras e de uma maneira mais ampla, o sensoriamento remoto pode ser definido como a tecnologia utilizada na detecção de objetos através de aviões e satélites, ou seja, sem que exista contato físico (GARCIA, 1982).

Novo (1992) define sensoriamento remoto como a aplicação de sensores para obter informações, seja de objetos ou fenômenos, sem o contato direto, uma vez que os sensores são instrumentos capacitados para coletar, converter e apresentar a energia proveniente do objeto de maneira adequada para o usuário. Desta forma, o sensoriamento remoto permite analisar as interações entre radiação eletromagnética e os componentes constituintes do planeta Terra.

De acordo com Augusto Filho (2013), o sistema sensor, que permite a conversão da energia eletromagnética, pode ser classificado como ativo ou passivo. O sistema ativo, como os radares, produz sua própria radiação; enquanto que os passivos como sistemas fotográficos, detectam a energia solar refletida ou emitida pelos alvos na superfície terrestre. Além disso,

os sensores são caracterizados quanto às resoluções espaciais, espectral, radiométrica e temporal.

A resolução espacial consiste na capacidade do sensor de identificar os objetos, ou seja, a menor distância entre o objeto e o sensor; a resolução espectral é caracterizada pelo número de bandas espectrais e pela largura do comprimento de onda; a resolução radiométrica de um sensor refere-se ao número de níveis digitais, representado em tons de cinza (CROSTA, 1992).

O sensoriamento remoto tem sido aplicado em diversos estudos relacionados à análise de processos erosivos. As imagens de satélite e fotografias aéreas são utilizadas para delimitar as feições erosivas, analisar a evolução temporal das feições; obter produtos cartográficos básicos e interpretativos, entre outras informações.

Uma das técnicas do sensoriamento remoto, que contribuem para a avaliação de feições erosivas, constitui a avaliação temporal. Dantas-Ferreira e Pejon (2004) desenvolveram um estudo temporal na região de São Pedro (SP) utilizando fotografias aéreas com diferentes datas (1962, 1972, 1978 e 2000). A partir destes dados, aplicando-se técnica de fotointerpretação, os autores elaboraram o Mapa de Feições, que permitiu analisar as erosões cadastradas quanto ao tipo (sulcos, ravinas ou voçorocas); característica de evolução; localização; uso do solo e outros.

Utilizando diversas técnicas e métodos, que possuem uma relação com o sensoriamento remoto, Poesen et al. (2003) sugerem algumas medidas para avaliação dos processos erosivos, com base na idade das voçorocas. Para análise das feições com menos de 10 anos, deverão ser realizados sobrevoo de baixa altitude, de maneira regular. A avaliação de feições com idade de 10 a 70 anos deve ser realizada por meio do uso de fotografias aéreas e para as feições com mais de 70 anos deve ser analisados dados históricos, como fotografias aéreas e imagens antigas, que permitam a datação dos depósitos decorrentes das erosões.

2.5.3 Processamento automático

Considerando as diversas funções do SIG, em muitos trabalhos tem sido realizado o processamento automático de dados espaciais com a finalidade de se obter diferentes dados, como modelo digital de elevação, mapa de declividades, mapa de área de drenagem, rede de drenagem, entre outros.

Para elaboração do limiar crítico de desencadeamento das erosões diversos autores utilizaram SIG, seja para obtenção do MDE (Modelo Digital de Elevação) ou parâmetros A e S, entre eles cita-se: Menéndez-Duarte et al. (2009), Gutiérrez et al. (2009); Nazari Samani et al. (2009); Araújo (2011) e Stabile (2013).

2.5.3.1 MDE

O Modelo Digital de Elevação (MDE) pode ser definido com um modelo matemático interpolado a partir de valores de cota do terreno em relação ao nível do mar, que representam uma superfície contínua, definida em um sistema de projeção cartográfica. Estes modelos podem ser apresentados de duas maneiras: formato vetorial *Triangular Irregular Network* (TIN) ou formato matricial "*raster*", disposto em uma matriz regular composta por linhas e colunas (AUGUSTO FILHO, 2013).

Segundo o autor citado, as principais diferenças entre os formatos vetoriais e matriciais são observadas nos fundos de vale e divisores topográficos. A representação destas regiões no formato TIN tende a ser mais grosseira diferente do formato *raster*, que apresenta uma interpolação mais suave, e por isso tem um aspecto visual melhor, como pode ser observado na Figura 21. Recomenda-se a aplicação de modelos com formatos TIN para realização de estudos planimétricos, como obras de terraplanagem, bem como o formato *raster* deve ser utilizado quando se torna fundamental a representação de uma superfície de elevação precisa e hidrologicamente consistente.





Os MDE são elaborados através das informações altimétricas do terreno, que podem ser obtidas de diferentes formas: levantamento topográfico; sensores orbitais ou pela interpolação de dados vetoriais, como curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem. A

Fonte: Adaptado de Walsh, 2017.

interpolação destes dados pode ser realizada por diferentes métodos, dependendo do *software* a ser utilizado.

Para elaboração dos MDE no ArcGIS utiliza-se a ferramenta *Topo to Raster*, que realiza a interpolação dos dados com base na técnica de diferenças finitas (HUTCHINSON, 1988, 1989). O processamento é otimizado pelo método da distância inversa ponderada (IDW - *Inverse Distance Weighted*), que determina o valor de um *pixel* não previsto a partir dos valores dos *pixel*s mais próximos, assumindo para isto que cada ponto medido tem uma influência (peso) que diminui conforme a distância dos dados matriciais (ESRI, 2017).

A ferramenta *Topo to Raster* apresenta como vantagem a representação de um modelo de saída hidrologicamente consistente, pois durante a interpolação da superfície de elevação leva-se em consideração a estrutura da rede de drenagem e a conexão entre os canais. A validação qualitativa dos modelos pode ser realizada gerando de maneira automática as curvas de nível, com o intuito de verificar se os valores de elevação do modelo estão em conformidade com a base cartográfica, para isto utiliza-se a ferramenta "*Countor Interval*" (AUGUSTO FILHO, 2011). A Figura 22, apresenta um esquema das principais etapas para elaboração do MDE no ArcGIS.





O arquivo gerado tende a apresentar erros na interpolação devido às resoluções dos dados de entrada, portanto conforme citado por Augusto Filho (2011), deve-se realizar a correção do modelo com a aplicação de filtros, que removem as depressões ou picos (*sinks*)

decorrentes destes erros. No ArcGIS utiliza-se o *Fill*, que realiza todas as iterações necessárias para que todos os *pixel*s destas depressões estejam com valores (z) dentro de um limite específico, conforme ilustrada na Figura 23.





Fonte: Adaptado de ESRI (2017).

A confiabilidade dos modelos produzidos está diretamente relacionada com os parâmetros de entrada, que devem estar em escala compatível com o tamanho do *pixel* de saída. Além disso, a influência da resolução espacial dos MDE reflete significativamente na avaliação dos diversos processos geomorfológicos.

Quinn et al. (1991), demonstraram que a obtenção do índice topográfico ($a/tan\beta$), que relaciona índice geomorfológico (a) e ângulo da declividade ($tan\beta$), aplicado na análise dos mecanismos de escoamento em encostas, depende da escala utilizada na elaboração do MDE, uma vez que a representação adequada de seus parâmetros, depende do tamanho de *pixel* adotado. Os autores destacam também a importância de uma avaliação em campo, a fim de que a representação espacial da superfície esteja em consonância com as reais características da área.

Em relação à predição dos processos decorrentes do escoamento superficial, como as erosões, Zhang e Montgomery (1994), afirmam que a representação das zonas de saturação depende do tamanho do *grid* a ser utilizado, pois devem estar em conformidade com as características da encosta, favorecendo a representação dos processos do geomórficos e hidrológicos. Os autores recomendam ainda, a adoção de modelos com resolução menor que 10 metros.

De acordo com Sorensen e Seibert (2007), a resolução do DEM afeta significativamente a obtenção de parâmetros como a área acumulada, pois apresentam relação direta com o tamanho do *pixel*, pois os valores do fluxo acumulado são calculados *pixel* a *pixel*, portanto, dependendo da escala utilizada podem ocorrer perdas de informações

hidrológicas. Para os autores a resolução ideal depende do parâmetro a ser estimado e da sua variação topográfica, portanto, dados com menores variações não requerem modelos com resoluções maiores.

Ramos et al. (2003) também citam que os mapas de áreas de contribuição, apresentam relação direta com a precisão dos MDE. Os modelos utilizados devem representar adequadamente os diferentes valores de elevação para cada porção do terreno, e também as trajetórias do fluxo hídrico, portanto, recomenda-se a utilização de modelos hidrologicamente consistente.

2.5.3.2 Aspectos hidrológicos

A utilização do SIG na modelagem hidrológica favorece o processamento automático dos dados e auxilia a delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas; rede de drenagem; mapas de direção de fluxo; fluxo acumulado, entre outros, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de diversas pesquisas.

Como a aplicação do SIG tem sido cada vez mais frequente, diversos pesquisadores desenvolveram ferramentas, "*open source*", que surgiram como alternativas para análise do terreno (ABERA et al., 2014). A Tabela 11 apresenta as características e tipos de análise que podem ser realizadas nestes *softwares*.

· · · · ·	TauDEM	LandSerf	GeoNET	Whitebox	GRASS GIS	uDig Spatial
Autor	Tarboton (1997)	Wood (2009)	Passalacqua et al. (2010)	Lindsay (2005)	Mitasova; Neteler (2004)	Abera et al. (2014)
Dados de superfície	Declividade; aspecto; curvatura	Declividade; aspecto; curvatura	Declividade; curvatura; <i>landforms</i>	Declividade; aspecto; curvatura	Declividade; aspecto; curvatura; <i>landforms</i>	Declividade; aspecto; curvatura
Direção de fluxo	D∞; D8	D8	D∞; D8	D∞; D8; FD8	D8; MFD	D8
Delimitação de bacias	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Índice topográfico	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim
Método de interpolação	IDW; TIN; Splines	Cressman	-	IDW; Nearest Neighbour	IDW; Nearest Neighbour	IDW;, Delaunay Triangulation; Thin Plate Spline
Visualização (layers)	Sim	Sim	Sim	Hillshade	3D vector; voxel	Aspect; 3D
TauDEM: Terrain	Analysis Using Di	gital Elevation Mode	els; GeoNET: Geom	orphic Feature Ext	action; Whitebox: V	Whitebox Geospatial

Tabela 11 - Softwares livres análise hidrológica.

TauDEM: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models; GeoNET: Geomorphic Feature Extraction; Whitebox: Whitebox Geospatial Analysis Tools; GRASS: Geographic Resources Analysis Support System; uDig: User-friendly Desktop Internet

Fonte: Adaptado de Abera et al. (2014).

Como apresento na Tabela 11 o processamento automático de dados espaciais, visando à análise hidrológica, pode ser realizado por meio da aplicação de diferentes algoritmos: D8, D-Infinity, Fd8. O primeiro deles surgiu em 1984, proposto por O'Callaghan e Mark (1984) e a partir deste método outros foram propostos, como descrito na Tabela 12.

Algoritmo	Autor	Princípio
D8 (Deterministic Eight-Node)	O'Callaghan; Mark (1984)	Define a direção do fluxo para oito possíveis direções, conforme o declive mais acentuado.
Rho8 (Random eight-node)	Fairfield; Leymarie (1991)	Fluxo distribuído em função da probabilidade calculada a partir da declividade.
FD8	Quinn et al. (1991)	Define o fluxo em função da declividade.
MF	Freeman (1991)	Distribui o fluxo à jusante de forma proporcional a declividade.
KINEMATIC	Lea (1992)	Associa a direção do fluxo ao aspecto de cada <i>pixel</i> .
DEMON (Digital elevation model networks)	Costa-Cabral; Burges (1994)	Determina o fluxo com base na orientação da vertente.
D-Infinity	Tarboton (1997)	Define as direções de fluxo a partir das facetas triangulares conforme a direção mais íngreme.

Tabela 12 - Algoritmos utilizados nas análises hidrológicas.

Dentre estes métodos um dos mais utilizados na literatura é o D8, devido a sua simplicidade e disponibilidade em *softwares*, como o ArcGIS. No entanto em diversos trabalhos a modelagem hidrológica, visando à avaliação de processos geomorfológicos, tem sido realizada por meio do algoritmo D-*Infinity*.

2.5.3.2.1 Métodos D8 e D-Infinity

O D8 é o algoritmo para determinação mais antigo e mais simples, e vem sendo amplamente empregado na elaboração dos mapas de direção de fluxo, fluxo acumulado e delimitação automática de bacias hidrográficas. O método proposto por O'Callaghan e Mark (1984) define a direção do fluxo a partir da diferença de cota existente entre oito *pixels* vizinhos, para isto, considera uma célula central entre estes *pixels* e direciona o fluxo para o *pixel* com maior inclinação. A Figura 24 ilustra o processamento da direção de fluxo a parti do D8.

Figura 24 - Direção de fluxo pelo método D8.



Fonte: Adaptado de ESRI (2017).

Apesar da sua simplicidade e ampla aplicação Tarboton (1997), cita que o D8 apresenta como desvantagem a discretização do fluxo, que ocorre porque o fluxo é distribuído igualmente em apenas oito direções de fluxo separadas por 45°, resultando em um modelo com linhas de fluxo paralelas ou convergentes, que não condizem com a realidade.

Para solucionar este problema Fairfield e Leymarie (1991) propuseram o Rh8 e Quinn et al. (1991) o FD8, com o intuito de definir a direção do fluxo baseando em análise estatística, sendo a distribuição do fluxo realizada de maneira proporcional conforme a inclinação dos *pixels* vizinhos. Lea (1992) e Costa-Cabral e Burges (1994) propuseram o KINEMATIC e DEMON, respectivamente, e definem as direções de fluxo com base em plano ajustado a partir das extremidades dos *pixels*, e não para um *pixel* central, como os demais métodos.

No entanto, conforme citado por Tarboton (1997), os modelos de múltipla direção baseados na declividade (Rh8, FD8, KINEMATIC) tendem a gerar caminhos de fluxo dispersos para os *pixels* vizinhos de menor elevação, pois a direção é determinada em função de um único *pixel*.

Considerando as vantagens e desvantagens de cada um destes métodos, Tarboton (1997) propôs o D-*Infinity*. Neste método a direção de fluxo é centrada em um *pixel* de interesse e direcionada para o *pixel* com maior elevação entre as oito facetas triangulares, que evitam a propagação de valores aproximados, e também a influência dos *pixels* vizinhos com menor valor de elevação. Caso as direções não sejam cardinais ou diagonais, considera-se o ângulo entre os dois *pixels* descendentes. A Figura 25 ilustra o cálculo destas direções a partir do D-*Infinity*.

Figura 25 - Direção de fluxo pelo método D-Infinity.



Fonte: Adaptado de Tarboton (1997).

A Figura 26 apresenta os mapas de influência para diversos algoritmos de interpolação, observa-se que o D8 restringe a direção de fluxo ao *grid* do modelo; no MS ocorre uma dispersão substancial; o KINEMATIC tende a gerar direções *pixel* a *pixel*, em forma de "escada"; o DEMON também apresenta dispersão e uma tendência de direções restritas ao *grid*, por fim, o D-*Infinity* apresenta menor divergência entre os contornos e *pixels* alinhada conforme a inclinação topográfica (TARBOTON, 1997).

Figura 26 - Mapa de influência para os diferentes métodos.



Fonte: Adaptado de Tarboton (1997).

Em diversos trabalhos tem sido realizada uma análise hidrológica, com o intuito de comparar as vantagens e desvantagens destes algoritmos. Farinasso et al. (2006) verificaram que, o D-*Infinity* permite uma melhor representação dos divisores de água e canais de drenagem, gerando consequentemente linhas de fluxo continuas, diferente do D8 que gera linhas angulares que se desviam dos canais de drenagem.

Ao avaliar a interferência dos métodos na elaboração automática da rede de drenagem, Oliveira et al. (2013) e Ramos et al. (2013), concluíram que o D-*Infinity* define as regiões de distribuição de fluxo, de maneira mais homogênea, favorecendo a identificação dos caminhos preferenciais, e consequentemente uma rede de drenagem mais precisa. Ramos et al. (2013) constataram ainda que este algoritmo se mostra mais confiável, para aplicação em modelos de previsão de áreas instáveis, processos erosivos, entre outros.

2.5.3.2.2 Área de Contribuição

O mapa de área de contribuição representa as zonas potenciais de saturação no relevo, que propiciam o desencadeamento de processos geomorfológicos. Estes mapas têm sido aplicados na previsão de áreas de instabilidade na encosta; avaliação do posicionamento espacial das erosões; elaboração dos índices geomorfológicos (relação entre área de contribuição e unidade de contorno), entre outros.

As áreas de contribuição também denominadas como fluxo acumulado permitem a identificação espacial dos divisores topográficos, e confluência e divergência das linhas de fluxo, determinadas em função da curvatura da encosta, desta forma, pode ser extraída a rede de drenagem e delimitação das bacias hidrográficas (VALERIANO, 2008).

A área de contribuição é calculada como a contribuição do próprio *pixel* mais a contribuição dos *pixels* vizinhos, conforme a direção do fluxo, desta forma, é atribuído a cada *pixel* o valor referente à quantidade de *pixels* que contribuem até ele (Figura 27). Os valores são expressos em unidade de contorno, que corresponde ao tamanho do *pixel* do modelo de entrada (TAUDEM, 2017).

	1	1	1	1	1	
llado	1	3	3	3	1	
acumu	1	1	11	1	2	
Fluxo	2	1	1	15	1	•2 •1 •1 1 5 •
	1	5	2	20	2	

Figura 27 - Representação do fluxo acumulado.

Fonte: Adaptado de Chaves (2002).

O processamento dos mapas de área de contribuição deve ser realizado em etapas e requer a elaboração de planos de informação básicos, que são utilizados como dados de
entrada. Diversos *softwares* são utilizados para processamento destes dados, entre eles destaca-se o ArcGIS (ESRI[®]) e TauDEM (TARBOTON, 1997).

O TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) é um *software* (*Toolbox ArcGIS*) que permite a análise e extração de informações hidrológicas, a partir dos modelos digitais de elevação. Algumas de suas aplicações são: desenvolvimento de MDE hidrologicamente consistentes; elaboração de mapas de direção de fluxo; delimitação de rede de drenagem e bacias hidrográficas; e análises especificas de encostas. Além disso, também permite a elaboração dos mapas de área de contribuição a partir dos algoritmos, D8 e D-*Infinity* (TAUDEM, 2017).

A elaboração destes mapas no TauDEM é realizada em três etapas (Figura 28), sendo a primeira delas a aplicação da ferramenta "*Pit*" que preenche os *pixels* que possuem valores menores que os seus vizinhos, gerando como dado de saída modelos digitais de elevação precisos e hidrologicamente consistentes. O processamento seguinte envolve a elaboração do mapa de direção de fluxo, que será em função do algoritmo utilizado, por fim, a última etapa é a elaboração do mapa de área de contribuição.



Figura 28 - Etapas para elaboração do mapa de área de contribuição no TauDEM.

No ArcGIS o processamento dos dados para elaboração dos mapas de área de contribuição é realizado através das ferramentas disponíveis no "*Spatial Analyst Tools - Hydrology*". Como ilustrado na Figura 29 o processamento dos dados é semelhante ao TauDEM, no entanto, utiliza-se apenas o algoritmo D8.

A primeira etapa consiste na aplicação do "*Fill*" para remoção dos "*sinks*", descrito no item (2.5.3.1). A segunda etapa é a elaboração da direção de fluxo, que resulta em um *raster* de saída com *pixels* cujos valores variam de 1 a 255, conforme a orientação da direção. Por fim aplica-se a ferramenta "*flow accumulation*" que gera um *raster* com os valores de cada *pixel* que contribuem para uma célula especifica. Os *pixels* com valores altos representam as áreas com elevada acumulação de água e representam os canais de fluxo, enquanto aqueles

com valor igual a zero, simulam os locais mais altos, como os divisores topográficos (ESRI, 2017).



Figura 29 - Etapas para elaboração do mapa de área de contribuição no ArcGIS.

Além destes mapas é possível realizar no "*Hydrology*" a delimitação da rede de drenagem a partir do mapa de fluxo acumulado. Para isto, conforme citado por Chaves (2002) é definido um limiar (*threshold*) que determina a área mínima da bacia de contribuição, portanto, todos os *pixel*s com valor superior a este limiar são classificados como parte da rede de drenagem. Para definir este limiar utiliza-se a ferramenta "*Con*" que reclassifica os *pixel*s conforme o valor estabelecido. A Figura 30 ilustra a aplicação do limiar (*threshold*).

Figura 30 - Representação do limiar (threshold).

Limiar (<i>Threshold</i>)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	3	2	2	0	0	3	2	2	0
	0	0	11	0	1	0	0	11	0	1
	0	0	1	15	0	0	0	1	15	0
	0	2	5	24	1	0	2	• 5	24	1
			Const						•	

Fonte: Adaptado de Chaves (2002).

Outra aplicação importante das ferramentas disponíveis no "*Hydrology*" em análise hidrológica é a delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas a partir do MDE hidrologicamente consistente e a direção de fluxo. Turcotte et al. (2001) citam que para obter este tipo de representação os parâmetros de entrada (MDE) devem apresentar uma estrutura que permita a definição da drenagem interna da bacia a ser analisada.

Os autores apresentam uma rotina para delimitação das bacias hidrográficas a partir do algoritmo D8 (Figura 31). No primeiro passo é calculada a direção de fluxo conforme o *pixel* com declive mais íngreme a jusante. Na segunda etapa, o limite da bacia hidrográfica é definido considerando todos os *pixel*s que fluem para um ponto de saída (exutório). A rede de

drenagem, na terceira etapa é elaborada conforme o limiar (*thershold*), e consequentemente as sub-bacias também são definidas considerando os *pixels* com área de drenagem superior ao limiar definido.



Figura 31 - Etapas para obtenção dos aspectos hidrológicos.

Fonte: Adaptado de Turcotte et al. (2001).

Bosquilia (2014) conclui que quantitativamente o processamento automático da rede de drenagem difere dos arquivos vetorizados, no entanto, são de grande utilidade para mapeamento de bacias onde não se dispõe destes dados. Desta forma, recomenda-se a utilização de um MDE hidrologicamente consistente, e algoritmos de interpolação propícios para obtenção de dados mais coerentes.

3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Córrego do Meio está localizada no município de São Pedro, situado no interior do estado de São Paulo, entre as coordenadas UTM 194000/199000mE e 7507000/7491000mN, na zona 23 Sul (Figura 32). A Bacia do Córrego do Meio possui uma área de 48,06 km², na qual 5 km² correspondem a uma porção da área urbana, e ordem de ramificação 5, segundo a classificação de Strahler. O Ribeirão do Meio que drena a região em estudo, nasce na Serra de São Pedro, e percorre toda a área com uma extensão de 41 km, até sua foz no Rio Piracicaba.

Na Figura 32 destaca-se a Sub-Bacia dos Córregos Alpes e Retiro que possui área de 6,81 km², e são de 3^a ordem de ramificação. Parte dos resultados obtidos neste trabalho foi realizado apenas nesta região com o intuito de analisar algumas condições, para posteriormente aplicar na Bacia do Córrego do Meio.



Figura 32 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Córrego do Meio.

O município de São Pedro possui uma área territorial de 610 km²; população de 32.000 habitantes; PIB *per capita* de 14.943,55 reais; e IDHM (2010) 0,755. O turismo é a

principal atividade econômica da região, com destaque para os atrativos naturais, culturais e históricos. Em relação à pecuária, destaca-se a criação de galinhas e bovinos, e quanto à produção agrícola, predomina o cultivo de cana-de-açúcar (IBGE, 2016).

A cidade localiza-se aproximadamente a 190 km de São Paulo, 100 km de Campinas, e 30 de Piracicaba, e tem como principais rodovias de acesso a SP 330 - Rodovia Anhanguera, e SP 280 - Rodovia Castelo Branco. Os municípios limítrofes são ao norte Itirapina e Torrinha; ao leste Charqueada; a oeste Santa Maria da Serra; e ao sul, Piracicaba (PMSP, 2016; IBGE, 2016).

3.1 Clima

De acordo com a classificação climática de Köppen, o município de São Pedro pertence à classe Aw, que corresponde a um clima tropical chuvoso com inverno seco, nos meses mais frios a temperatura média superior é em torno de 18°C e, nos meses mais secos a precipitação inferior é de 60 mm (CEPRAGRI, 2016). A Figura 33 apresenta a média dos dados pluviométricos mensais, para o período de 1942 a 2000.



Figura 33 - Distribuição das chuvas na região de São Pedro.

Fonte: DAEE, 2016.

3.2 Vegetação

Segundo o IBGE (2004), o bioma predominante no município de São Pedro é o Cerrado, que se caracteriza por uma formação vegetal do tipo savana tropical. Os tipos de cobertura florestal predominante na região, conforme o Mapa Florestal de São Pedro - 1:200.000 (IF, 2001), são as áreas de mata, capoeira e reflorestamento.

As espécies vegetais que ocorrem na região próxima ao município de São Pedro são herbáceas, como Gramíneas *Eragrostis perennis Doell*, que se desenvolvem em ambientes abertos com elevada luminosidade. Ocorrem também plantas que podem ser consideradas daninhas, como Compositae; Gramineae; Leguminosae; Malvaceae; Scrophylariaceae; Sterculiaceae, que estabelecem em solos arenosos, com baixo índice de fertilidade (FACINCANI; CAVALHEIRO, 1995).

3.3 Geologia e Geomorfologia

A geomorfologia da área em estudo compreende três unidades geomorfológicas: Serra de São Pedro; Cuestas Basálticas (Escarpa de Serra) e Depressão Periférica (IPT, 1981). Na região ocorrem rochas sedimentares das Formações Itaqueri, Pirambóia e Botucatu, e rochas ígneas da Formação Serra Geral (PEJON, 1992). A Tabela 13 apresenta as características das unidades litoestratigráficas presentes na área.

Unidades Características Grupo Formação Arenitos imaturos, geralmente grosseiros, conglomeráticos, com seixos de arenitos e Kti Bauru Itaqueri quartzitos. Apresentam cores variadas e espessura na ordem de dezenas de metros. Formação JKsg Basaltos, textura afanítica, com fraturamento do tipo colunar. Serra Geral Arenitos de granulação fina a média, silicificados, de cores amarelados, com Grupo Formação Jkb Botucatu estratificação cruzadas, e fraturamentos verticais e horizontais. São Depósitos fluviais e de planície de inundação, incluindo arenitos finos a médios, siltico Bento Formação TrJp argiloso, de estratificação cruzada ou plano-paralela; níveis de folhelhos e arenitos Pirambóia argilosos de cores variadas e intercalações areno-conglomerática.

Tabela 13 - Características litoestratigráficas das formações presentes na área em estudo.

Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

3.3.1 Materiais inconsolidados

Pejon (1992) elaborou o Mapa de Materiais Inconsolidados - 1:100.000 - Folha Piracicaba, que abrange a região do município de São Pedro, na qual foram identificados os materiais descritos na Tabela 14, bem como suas propriedades.

							1	naiera	uis inc	consona	aaos					
e		Granulometria								Índices Físicos F				nsaio de Azul de Metileno		
dad	Argila		Silte			Areia		ρ_s	ρ_d	e_0	VB	Acb	СТС	SE		
Jni	Min	Mód	Max	Min	Mód	Max	Min	Mód	Max	g/cm ³	g/cm ³	a/am3	g/100 g	g/100 g	meq./100	m²/g
2	with	wieu	wian	with	meu	wian	with	wieu	wian	g/cm	g/cm	_	solo	argila	g solo	argila
2-2-10	17	29	35	1	6	12	53	68	76	2,68	1,38	0,97	0,32	1,1	1,0	27
1-3-9	10	38	56	8	17	35	24	44	64	2,90	1,34	1,20	2,26	4,5	7,1	109
2-1-7	0	0	15	0	2	7	77	80	94	2,65	1,55	0,70	0,29	2,8	0,9	67
1-2-7	10	10	15	10	10	15	75	80	89	2,7	1,5	0,70	1,86	11,9	5,8	283
. 6	2-2	2-10	Trans	portado	o da Foi	rmação	Itaque	ri								
igos ade.	1-:	3-9	Resid	Residual da Formação Serra Geral												
Cód unid	2-	1-7	Trans	portado	o da Foi	rmação	Piram	bóia (<	20% Fi	nos)						
	1-2	2-7	Resid	ual da	Formaç	ão Pira	mbóia									

Madaniaia Tarana alidadaa

Tabela 14 - Dados referentes às principais unidades de materiais inconsolidados da região em estudo.

 ρ_s - massa especifica dos sólidos; ρ_d - massa específica aparente seca; e_0 - índice de vazios; VB - volume de azul de metileno adsorvido; Acb - índice de atividade da fração fina; CTC - capacidade de troca catiônica; SE - superfície específica;

Fonte: Adaptado de Pejon (1992).

Gomes (2002) elaborou o Mapa de Materiais Inconsolidados da Bacia do Córrego do Meio - 1:20.000, e identificou os seguintes materiais: residual da Formação Itaqueri; residual da Formação Serra Geral; residual da Formação Botucatu; Sedimentos Coluvionares; Transportado da Formação Pirambóia; Sedimentos aluvionares; e residual da Formação Pirambóia.

3.4 Pedologia

Os solos presentes na região de São Pedro de acordo com Oliveira e Prado (1989) são latossolo roxo distrófico; latossolo vermelho escuro; latossolo vermelho amarelo; podzólico vermelho amarelo; areia quartzosa; solos litólicos e gleizados.

3.5 Aspectos Hidrológicos

3.5.1 Hidrogeologia

Considerando as informações coletadas no Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo - Escala 1:1.000.000 (DAEE, 2007), a unidade aquífera predominante na Bacia do Córrego do Meio é o Aquífero Guarani, que está situado em rochas do tipo arenito, e se caracteriza como um aquífero sedimentar, contínuo, parcialmente livre e dominantemente confinado, com elevada transmissividade. Esse aquífero apresenta um potencial de produção de 80 a 120 m³/h, considerando uma escala regional. Ocorre também na área, em sua porção ao norte, o Aquífero Serra Geral que se caracteriza por ser do tipo fraturado, descontínuo, com porosidade e permeabilidade associadas às fraturas e vesículas, sua rocha principal é o basalto, e, além disso, sua produtividade é em torno de 3 a 23 m³/h.

3.5.2 Hidrologia

A Bacia Hidrográfica do Córrego do Meio está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - Piracicaba/Capivari/Jundiaí (UGRHI 05) pertencente à Região Hidrográfica da Bacia do Rio Tietê. A UGRHI 05 localiza-se em uma importante região econômica e urbana do país, com sua maior parte do estado de São Paulo. Possui uma área de 15.303 km², e uma população total de 5.000.000 habitantes, sendo Campinas, Piracicaba e Jundiaí os municípios mais populosos. Compõem esta unidade sete sub-bacias principais: rio Piracicaba e seus afluentes, rios Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia (CBPE, 2011).

Especificamente em relação ao Ribeirão do Meio que drena toda a bacia hidrográfica em estudo, nasce da Serra de São Pedro, possui 41 km, ordem de ramificação 5 conforme a classificação de Strahler, e a sua foz no Rio Piracicaba. A bacia em estudo está situada entre as Bacias do Ribeirão Vermelho, a oeste e, Samambaia a leste. Além destas, encontram-se inseridas no município de São Pedro as Bacias do Ribeirão Serelepe, Bonito, Tabaranas e Barra. Segundo a PMSP (2013), estes corpos hídricos foram enquadrados na Classe 2, conforme a legislação ambiental vigente - CONAMA 357/2005.

3.6 Uso e Ocupação do Solo

A partir do Mapa de Uso e Cobertura do Solo da UGRHI 5 (PCJ) - 1:25.000 (IG, 2013) verifica-se que as classes predominantes na Bacia do Meio são: pastagem; mata; cultura semiperene; e área edificada. A Tabela 15 apresenta as classes do uso e ocupação e seus respectivos percentuais, e a Figura 34 o Mapa de Uso e Cobertura da Terra (2013).

Classe	Área (km²)	Percentual (%)
Área edificada	6,19	12,88
Área úmida	0,88	1,83
Campo natural	3,95	8,22
Cultura semiperene	9,03	18,79
Cultura temporária	0,06	0,12
Curso d'água	0,004	0,01
Grande equipamento	0,14	0,29
Lagos, lagoas e represas	0,10	0,21
Loteamento	0,03	0,06
Mata	11,00	22,89
Pastagem	11,42	23,76
Reflorestamento	3,04	6,32
Solo exposto	2,22	4,62

Tabela 15 - Área e percentual das classes do uso e cobertura do solo.



Figura 34 - Mapa de uso e ocupação da terra (2013) da Bacia do Córrego do Meio.

Fonte: Adaptado de IG (2013).

A área edificada corresponde às áreas residenciais, comerciais, de serviços e rodovias; espaço verde urbano são as praças, parques e demais áreas verdes públicas; cultura perene são as áreas com plantações de cana de açúcar; a área descrita como grande equipamento correspondem às áreas ocupadas por indústrias, ETE, ETA, aterro sanitário, cemitério, galpão industrial e edificações agrícolas (IG, 2013).

4.1 Materiais

Os materiais e *softwares* utilizados para desenvolvimento da pesquisa estão descritos na Tabela 16. As folhas topográficas foram utilizadas para digitalização das curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem; as imagens de satélite para levantamento das feições erosivas atuais; os mapas e cartas para caracterização da área em estudo; e os *softwares* foram utilizados para estruturação do banco de dados; manipulação e elaboração dos mapas e cartas.

Тіро	Nome/descrição	Autor/Fonte		
	Fazenda São Bento (SF-23-Y-A-IV-1-NO-A)			
	São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-B)			
Folhas topográficas	São Pedro II (SF-23-Y-A-IV-1-NO-C)			
(1:10.000)	São Pedro III (SF-23-Y-A-IV-1-NO-D)	IGC (1979)		
(11101000)	Ribeirão do Meio (SF-23-Y-A-IV-1-NO-E)	-		
	Águas de São Pedro (SF-23-Y-A-IV-1-NO-F)	-		
	Ribeirão Vermelho (SF-23-Y-A-IV-1-SO-A)			
Imagens de satélite	Pléiades; SPOT-6; SPOT-7 (2016)	Google Earth Pro		
intagens at sateme	Ortofotos (2011)	Emplasa		
	Mapa de uso e ocupação do solo (1:50.000)	Dantas-Ferreira (2008)		
	Mapa de landforms (1:20.000)			
Mapas e cartas	Mapa de substrato rochoso (1:20.000)	Comes (2002)		
	Mata de materiais inconsolidados (1:20.000)	- Gomes (2002)		
	Carta de susceptibilidade à erosão (1:20.000)			
	ArcGIS 10.3			
Softwares	AutoCAD Map			
	TauDEM 5.1.2			

Tabela 16 - Materiais e softwares utilizados na pesquisa.

4.2 Métodos

A sistemática de trabalho adotada na pesquisa envolveu a realização das seguintes etapas: compilação de dados da área em estudo; sensoriamento remoto; processamento dos dados em ambiente SIG; análise comparativa dos índices SxA das Sub-bacias dos Córregos dos Alpes e Retiro; elaboração dos índices SxA para a Bacia do Córrego do Meio; zoneamento de áreas críticas para ocorrência de processos erosivos (Figura 35).



Figura 35 - Etapas de trabalho.

4.2.1 Compilação de dados

Esta etapa compreendeu o levantamento de informações existentes da área em estudo: dados bibliográficos; mapas topográficos; imagens de satélite; e mapas e dados geológicogeotécnicos, obtidos de trabalhos desenvolvidos na região. Também foi realizado nesta fase etapa de campo, para reconhecimento da área e avaliação *in loco* das principais feições.

Os dados compilados foram tabulados e organizados em um banco de dados georreferenciado, descrito na Tabela 17.

Dados	Escala	Fonte
Mapas topográficos	1:10.000	IGC (1979)
Mapa de landforms	1:20.000	Gomes (2002)
Mapa de materiais inconsolidados	1:20.000	Gomes (2002)
Mapa de substrato rochoso	1:20.000	Gomes (2002)
Carta de susceptibilidade à erosão	1:20.000	Gomes (2002)
Mapa de uso e ocupação do solo	1:50.000	Dantas-Ferreira (2008)
Mapa de feições erosivas	1:15.000	Araújo (2011)
Dados de ensaios geotécnicos	-	Gomes (2002)

Tabela 17 - Estrutura do banco de dados da Bacia do Córrego do Meio.

A Figura 36 apresenta o mosaico com as cartas topográficas do IGC (1979), que serviu como base de referência do trabalho. A rede de drenagem, curvas de nível e pontos cotados foram digitalizadas em formato vetorial (*.dwg*) e importadas para a extensão *shapefile* (*.shp*), que permite o processamento e edição dos arquivos no ArcGIS[®] 10.3.

As cartas e mapas geotécnicos obtidos do trabalho de Gomes (2002) foram digitalizados no ArcGIS[®] 10.3, e adaptados para a Bacia do Córrego do Meio, convertendo o sistema de projeção, para "SIRGAS 2000 - Zona UTM 23S". Quanto aos ensaios laboratoriais para obtenção dos dados geotécnicos, a autora utilizou as seguintes normas:

- Granulometria conjunta: ABNT NBR 781/1984;
- Massa específica dos sólidos (ρ_s): ABNT NBR 6508/1984;
- Massa específica aparente seca (ρ_d): Zuquette (1987);
- Adsorção do Azul de metileno: Pejon (1992);
- Erodibilidade: Nogami e Villibor (1979).



Figura 36 - Mosaico das cartas topográficas da área em estudo.

4.2.2 Sensoriamento Remoto

Inicialmente foi realizado a compilação das feições erosivas localizadas nas Subbacias dos Córregos dos Alpes e Retiro, mapeadas por Araújo (2011) na escala de 1:15.000. Através da interpretação das imagens de satélites atuais foi observada a situação atual destas feições, com a finalidade de complementar as informações obtidas pelo autor.

As etapas seguintes compreenderam o mapeamento das demais feições localizadas na Bacia do Córrego do Meio, utilizando imagens de satélite de 2016 (SPOT/Pléiades) e também ortofotos da Emplasa (Tabela 18). Na plataforma do *Google Earth Pro*, foram identificadas as coordenadas UTM de cada uma das feições, seguida pela sobreposição com as ortofotos para verificação dos dados levantados. As informações foram tabuladas no *software* Excel[®] e importadas para o ArcGIS[®] 10.3, para processamento e análise dos dados.

Durante esta fase também foram levantadas informações sobre posição das feições no relevo; profundidade dos canais; e uso e ocupação do local, para isto foram utilizados os mapas de *landforms*, mapa de uso e ocupação e as ortofotos, que auxiliaram na determinação remota destes dados.

Tabela 18 - Característica das ortofotos.

Ortofotos Emplasa						
Resolução	1 metro					
Aquisição	2011					
Câmera	Ultracam - Modelo X e XP					
Aeronaves	Turboélice Carajá/Jato Lear Jet					
Composição Cores	RGB					

Fonte: Mapeia São Paulo (2017).

4.2.3 Processamento dos dados em SIG

Esta etapa compreendeu a elaboração de produtos cartográficos básicos em escala de 1:20.000 no *software* ArcGIS[®] 10.3.

4.2.3.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação foi elaborado a partir de curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem, compilados das cartas topográficas do IGC (1979). É importante ressaltar que a rede de drenagem deve apresentar os canais digitalizados de maneira adequada, isto é, devem estar conectados da nascente até a foz, favorecendo a representação correta dos valores de elevação.

A ferramenta utilizada para interpolação destes dados foi "*3D Analyst Tools - Raster Interpolation - Topo to raster*" (HUTCHINSON, 1988 e 1989), e se baseia na técnica de interpolação iterativa de diferenças finitas. Foram usados três tamanhos de *pixels* para os dados de saída, 2, 10 e 30 metros, com a finalidade de analisar a resolução mais adequada para obtenção dos parâmetros morfométricos: área de contribuição e declividade média.

Após a obtenção dos arquivos, foi aplicado um filtro "Spatial Analyst Tools -Neighborhood - Filter" para remoção das depressões (sinks). Realizou-se a validação qualitativa dos modelos produzindo as curvas de nível de maneira automática a partir da ferramenta "3D Analyst Tools - Raster Surface - Contour". Os arquivos foram comparados visualmente com as curvas de nível digitalizadas das cartas topográficas do IGC (1979).

4.2.3.2 Carta de Declividades

As Cartas de Declividades foram elaboradas por meio da ferramenta "*3D Analyst Tools - Raster Surface - Slope*" utilizando diferentes tamanhos de *pixel*, 2, 10 e 30 metros, assim como os MDE. Para cada célula do arquivo matricial, a ferramenta identifica as variações decorrentes dos valores de altitude (z) que indicam o valor da declividade *pixel* a *pixel*, em percentuais ou graus. As classes adotadas foram definidas conforme as recomendações do IG (1993), estabelecidas em função das características do terreno (Tabela 19).

Classes (%)	Características
0 - 2	Terrenos planos ou quase planos, onde o escoamento superficial é muito lento ou lento.
2 5	Terrenos com declividades suaves nos quais o escoamento superficial é lento ou médio e os
2-5	problemas de erosão requerem práticas simples de conservação.
5 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio
5-10	e rápido, porém com poucos problemas de erosão superficial.
10 15	Terrenos muito inclinados, ou colinosos, onde o escoamento superficial é rápido. Apresentam
10 - 15	problemas de erosão superficial, exceto quando ocorrem em solos permeáveis e pouco arenosos.
15 - 20	Terrenos inclinados onde o escoamento superficial é rápido, com problemas de erosão superficial.
20 25	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido, susceptível a ocorrência
20 - 23	de processos erosivos.
	Terrenos fortemente inclinados a muito íngremes, com escoamento superficial muito rápido e com
25 - 50	desenvolvimento de solo raso a muito raso. Susceptível a ocorrência de processos erosivos,
	sujeitos a movimentos de massa e queda de blocos.
> 50	Terrenos muito íngremes ou escarpados, com desenvolvimento de solos muito rasos, com
> 50	exposição da rocha; extremamente susceptível a erosão.

Tabela 19 - Definição das classes de declividade.

4.2.3.3 Área de contribuição

Para elaboração dos mapas de área de contribuição foram utilizados dois algoritmos, com o objetivo de analisar a viabilidade de cada um dos modelos de fluxo: D8 - *Determinisc eight-neighbors* (O'CALLAGHAN; MARK, 1984) e D-*Infinity* (TARBOTON, 1997). O D8 determina a direção de fluxo a partir das diferenças de cotas existentes entre os oito *pixels* vizinhos, e o D-*Infinity* considera infinitas possibilidades de direção de fluxo, distribuídas proporcionalmente entre os *pixels* (Figura 37).

Figura 37 - Métodos para determinar as direções de fluxo.



Fonte: Adaptado de Bosquilia et al. (2014).

A elaboração dos mapas de área de contribuição deve ser realizada em etapas, conforme o fluxograma da Figura 38. Para aplicação do D8 utilizou-se as ferramentas do *"Spatial Analyst Tools - Hydrology", o "Fill"* remove as imperfeições (*sinks*) que surgem devido à resolução dos dados ou aproximação dos valores de elevação para o número inteiro mais próximo; o *"Flow Direction"* gera o mapa com as oito direções de fluxo; e com base neste último arquivo define-se o fluxo acumulado para cada *pixel* do *raster* de entrada.

Quando ao D-Infinity utilizou-se o software TauDEM[®] 5.1.2 (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models), como extensão do ArcToolbox - ArcGIS. Os arquivos gerados a cada etapa (*Pit, D-Infinity flow direction e D-Infinity contributing area*) segue o mesmo princípio das ferramentas do "Hydrology", porém com algoritmos de interpolação diferentes.



Figura 38 - Etapas para elaboração do mapa de área de contribuição.

No *software* TauDEM[®] utilizou-se também a ferramenta "*D-Infinity Upslope Dependece*", que quantifica os *pixels* que contribuem para um determinado ponto, de acordo com a direção de fluxo. Para isto, inicialmente foi criada uma matriz regular, onde se atribuiu

valor igual à "1" ao *pixel* de destino, sendo este o ponto de cabeceira das feições, e valor "0" aos demais *pixels*. A Figura 39 apresenta um esquema destes algoritmos.

ope	0.6	0	0	0
, Upslo dence	0.3	0.3	0	0
ıfinity Depen	0	0.6	0	0
D-II	0	1	0	0
		GRIDCELL	V	

Figura 39 - Representação da ferramenta "D-Infinity Upslope Dependence".

Fonte: Adaptado de TauDEM (2016).

Os mapas de fluxo acumulado obtidos (D8 e D-*Infinity*) foram validados por meio da obtenção da rede de drenagem automática, que foi comparada com a digitalizada da carta topográfica do IGC (1979).

4.2.4 Índices SxA

A elaboração dos índices SxA foi realizada em duas etapas: a primeira, compreendeu a geração para os mesmos pontos de feições erosivas mapeadas por Araújo (2011), localizadas nas Sub-Bacias dos Córregos dos Alpes e Retiro, com o objetivo de comparar os índices obtidos em função do algoritmo de fluxo acumulado. A segunda etapa consistiu na aplicação do índice para todas as erosões da Bacia do Córrego do Meio, mapeadas no presente trabalho e também por Araújo (2011).

Os parâmetros declividade média (S) e área de contribuição (A) foram obtidos a partir dos mapas elaborados na etapa anterior (Item 4.2.3). Os arquivos matriciais do fluxo acumulado foram convertidos para "*shapefile*" e as respectivas áreas calculadas em hectares (ha). Para obtenção da declividade média foi realizado um recorte da Carta de Declividade (*Data Management Tools - Raster - Raster Processing - Clip*), considerando a área de contribuição de cada feição, sendo os dados que estavam em valores percentuais, convertidos para m.m⁻¹. As informações obtidas foram organizadas em planilhas, e os gráficos foram elaborados no Excel.

Para definir os limiares críticos (*thresholds*) topográficos a partir da relação SxA proposta por Patton e Schum (1975), descrita na Equação 8 foi utilizado o *software* Excel[®]. Os dados

de declividade média (S) e área de contribuição (A) de cada uma das feições foram plotados no plano cartesiano e calculou-se uma linha de regressão, com a função potência (*Power Function*).

$$S = aA^{-b} \tag{8}$$

O ajuste da linha de regressão para o limiar inferior dos dados analisados, representando o limite crítico das feições erosivas, foi realizado de maneira empírica. Após obter a equação da reta, calculou-se um novo valor para o coeficiente "*a*" a partir das coordenadas do ponto mais próximo do limiar crítico. Autores como Vanwalleguem et al. (2005) e Stabile (2013) realizaram este mesmo procedimento para determinar o limiar de desencadeamento das feições. A Figura 40 apresenta um exemplo hipotético deste ajuste.





Após a obtenção dos índices SxA para a Bacia do Córrego Meio, analisou-se as características específicas de cada uma das feições, como posicionamento no relevo, uma vez que os valores dos coeficientes "a" e "b" dependem das características do ambiente. A análise foi realizada com o intuito de classificar as feições erosivas em grupos com características similares, permitindo um melhor ajuste dos dados.

4.2.5 Zoneamento de áreas críticas de processos erosivos

A partir dos índices SxA obtidos foram elaboradas as Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Processos Erosivos, em escala 1:20.000, que representa as áreas críticas e instáveis. Foi utilizada a ferramenta "*Spatial Analyst Tools - Map Algebra - Raster Calculator*", que permite a aplicação de expressões algébricas em arquivos matriciais.

A Equação 9 apresenta a expressão utilizada, no qual foram inseridos como parâmetro de entrada a Carta de Declividades e o Mapa de Fluxo Acumulado (D-*Infinity*) da Bacia do Córrego do Meio. O resultado deste processamento consiste em um *raster* com *pixels* cujos valores são 0 e 1, sendo que, os *pixels* com valor igual a 0 estão abaixo do limiar crítico, e os *pixels* com valores iguais a 1 são aqueles que estão acima do limiar crítico, são os que representam as áreas críticas onde ocorrerá a formação de canais de erosão.

$$declividade \ge a * (fluxoacumulado ** (-b))$$
⁽⁹⁾

A Figura 41 ilustra o processamento realizado nesta etapa, na qual é possível observar que a carta de zoneamento consiste em arquivo matricial que representa para cada *pixel* a relação entre a declividade e o fluxo acumulado.



Figura 41 - Processamento para elaboração da carta de zoneamento.

Como forma de verificar a compatibilidade dos resultados obtidos a partir da relação SxA com documentos cartográficos elaborados previamente, utilizou-se a Carta de Susceptibilidade à Erosão elaborada por Gomes (2002), para a Bacia do Córrego do Meio na escala de 1:20.000. Para analisar os dados em ambiente SIG (ArcGIS[®]), inicialmente foi

realizado o georreferenciamento e digitalização da carta, uma vez que o arquivo estava disponível no formato *.jpg*, o que não permitia a realização dos processamentos necessários.

Desta forma, para realizar a tabulação cruzada entre as Cartas de Zoneamento e Carta de Susceptibilidade, utilizou-se a ferramenta "*Spatial Analyst Tools - Zonal - Tabulate Area*" a fim de verificar a correlação existente entre as áreas críticas e susceptíveis, analisando os valores equivalentes em km² e %. Tais valores foram plotados e analisados graficamente no *software* Excel[®].

5. RESULTADOS

Os resultados iniciais apresentados neste capítulo são os documentos cartográficos básicos que foram utilizados para caracterização da Bacia do Córrego do Meio, e os mapas obtidos pelo processamento em SIG - MDE, Carta de Declividades e Mapas de Fluxo de Acumulado - planos de informações básicos para o desenvolvimento do trabalho.

Nos próximos itens deste capítulo são apresentados os resultados para a Sub-bacia do Córrego dos Alpes e Retiro: interferência da resolução espacial, comparação entre D8 e D-Infinity, e índices SxA. Por fim são apresentados os resultados referentes ao objetivo geral deste trabalho, para a Bacia do Córrego do Meio: índices SxA e Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Processos Erosivos.

5.1 Documentos Cartográficos

5.1.1 Mapa de Documentação

O Mapa de Documentação da Bacia do Córrego do Meio apresenta todas as informações reunidas durante o desenvolvimento do trabalho, como pode ser observado na Figura 42.

- As Curvas de nível, rede de drenagem e pontos cotados foram obtidas por meio dos Mapas Topográficos 1:10.000 (IGC, 1979). Estes arquivos foram importados para o Banco de Dados da Bacia do Córrego do Meio, e convertidos para o sistema de projeção UTM "SIRGAS 2000 - Zona 23 S", com o auxílio de ferramentas do ArcGIS;
- Os pontos de feições erosivas localizados nas Sub-bacias dos Córregos dos Alpes e Retiro foram compilados do trabalho desenvolvido por Araújo (2011), em escala de 1:10.000, totalizando 35 pontos de feições do tipo sulcos, ravinas e voçorocas, locados em área de encostas ou drenagem. Os pontos mapeados neste trabalho com o auxílio de imagens de satélites e ortofotos consistem em 23 feições erosivas do tipo sulcos, ravinas e voçorocas.

Verifica-se que parte da área urbana do município de São Pedro - SP está inserida na Bacia do Córrego do Meio, que se caracteriza pela presença de chacreamentos e ruas não •

pavimentadas, que por sua vez, podem contribuir para o surgimento e evolução de feições erosivas. As informações para cada um dos pontos de feições erosivas localizados na área em estudo como tipo, profundidade, localização, e uso e ocupação está descrita na Tabela 20.



Nº	X	Y	Тіро	P (m)	Posição ^(*)	M.I.	A (m ²)	S (%)	Uso (2011)	Uso (2016)
1	197500	7504230	Ravina	0,5 a 1	Encosta	SC	9162,99	41,6	Pastagem	Pastagem
2	195095	7503886	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>11011,98</td><td>7,23</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	11011,98	7,23	Pastagem	Pastagem
3	194737	7504510	Ravina	0,5 a 1	Drenagem	SC	7857,07	35,38	Pastagem	Pastagem
4	196554	7501732	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>13129,00</td><td>5,59</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<5)<>	13129,00	5,59	Urbano	Urbano
5	196851	7500337	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>85029,24</td><td>6,16</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<10)<>	85029,24	6,16	Urbano	Urbano
6	196876	7500331	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>67394,23</td><td>6,27</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<10)<>	67394,23	6,27	Urbano	Urbano
7	196899	7500261	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>43647,36</td><td>6,8</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<10)<>	43647,36	6,8	Urbano	Urbano
8	196810	7500340	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>69479,27</td><td>5,85</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<10)<>	69479,27	5,85	Urbano	Urbano
9	198167	7497750	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>8087,52</td><td>13,62</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	8087,52	13,62	Pastagem	Pastagem
10	198211	7497788	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>7191,9</td><td>11,34</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	7191,9	11,34	Pastagem	Pastagem
11	197163	7494976	Ravina	0,5 a 1	Encosta	RFP	7267,15	10,59	Pastagem	Pastagem
12	196562	7504990	Sulco	< 0,5	Encosta	SC	5901,43	63,42	Pastagem	Pastagem
13	196629	7504968	Sulco	< 0,5	Encosta	SC	6185,26	62,95	Pastagem	Pastagem
14	196642	7504879	Sulco	< 0,5	Drenagem	SC	9082,31	57,89	Pastagem	Pastagem
15	195456	7502848	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>16394,81</td><td>7,29</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	16394,81	7,29	Pastagem	Pastagem
16	197604	7503498	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>21719,31</td><td>5,33</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	21719,31	5,33	Pastagem	Pastagem
17	197445	7495556	Sulco	< 0,5	Encosta	RFP	4709,48	8,83	Cana	Cana
18	197586	7495435	Sulco	< 0,5	Encosta	RFP	10673,22	8,55	Cana	Cana
19	198531	7497518	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	TFP (2 <e<5)< td=""><td>9539,95</td><td>10,87</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	9539,95	10,87	Pastagem	Pastagem
20	197879	7497725	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>6017,35</td><td>14,53</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	6017,35	14,53	Pastagem	Pastagem
21	194879	7504671	Sulco	< 0,5	Encosta	SC	8870,93	38,33	Pastagem	Pastagem
22	196103	7494969	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP	4028,26	9,68	Cana	Cana
23	197517	7503420	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>23410,62</td><td>6,55</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	23410,62	6,55	Pastagem	Pastagem
24	197247	7497193	Ravina	0,5 a 1	Encosta	RFP	3439,51	12,71	Pastagem	Pastagem
25	197200	7497225	Ravina	0,5 a 1	Encosta	RFP	3017,37	14,54	Pastagem	Pastagem
26	197196	7497396	Ravina	0,5 a 1	Encosta	RFP	2723,82	12,0	Pastagem	Pastagem
27	197084	7497576	Ravina	< 0,5	Encosta	RFP	4681,82	13,74	Pastagem	Pastagem
28	197175	7497663	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	RFP	7032,89	14,23	Pastagem	Eucalipto
29	197103	7497649	Ravina	0,5 a 1	Encosta	SA	3852,73	12,06	Pastagem	Pastagem
30	197398	7497302	Ravina	0,5 a 1	Encosta	RFP	1982,83	15,01	Pastagem	Pastagem
31	197429	7497366	Ravina	0,5 a 1	Encosta	RFP	4050,54	19,1	Pastagem	Eucalipto
32	197921	7498301	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>6846,00</td><td>8,49</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	6846,00	8,49	Pastagem	Cana
33	198580	7497466	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (2 <e<5)< td=""><td>11462,14</td><td>11,21</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	11462,14	11,21	Pastagem	Pastagem
34	198007	7498391	Ravina	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>9264,80</td><td>8,13</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	9264,80	8,13	Pastagem	Cana
35	198048	7498402	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>7906,8</td><td>7,46</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	7906,8	7,46	Pastagem	Cana
36	198089	7498429	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>9608,94</td><td>8,1</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	9608,94	8,1	Pastagem	Cana
37	198133	7498432	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>8750,66</td><td>7,69</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	8750,66	7,69	Pastagem	Cana
38	197712	7499749	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>14830,92</td><td>13,08</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<10)<>	14830,92	13,08	Urbano	Urbano
39	197703	7499727	Voçoroca	> 2,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>11323,26</td><td>12,18</td><td>Urbano</td><td>Urbano</td></e<10)<>	11323,26	12,18	Urbano	Urbano
40	197961	7497861	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>9779,02</td><td>11,23</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<10)<>	9779,02	11,23	Pastagem	Cana
41	197737	749739	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	RFP	6929,81	20,23	Eucalipto	Eucalipto

Tabela 20 - Pontos de feições erosivas da Bacia do Córrego do Meio (Continua).

Nº	X	Y	Tipo	P (m)	Posição ^(*)	M.I.	A (m ²)	S (%)	Uso (2011)	Uso (2016)
42	198841	7498924	Voçoroca	1 a 1,5	Drenagem	TFP (5 <e<10)< td=""><td>25606,38</td><td>4,65</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	25606,38	4,65	Pastagem	Pastagem
43	198513	7498592	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>11081,00</td><td>5,58</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<10)<>	11081,00	5,58	Pastagem	Cana
44	197550	7498336	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	SA	13542,94	14,9	Pastagem	Pastagem
45	197508	7497974	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	RFP	3603,52	17,06	Pastagem	Pastagem
46	197642	7497816	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	TFP (2 <e<5)< td=""><td>9479,51</td><td>18,05</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	9479,51	18,05	Pastagem	Pastagem
47	198515	7498607	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>10857,08</td><td>5,32</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<10)<>	10857,08	5,32	Pastagem	Cana
48	197081	7497501	Ravina	< 0,5	Encosta	RFP	9865,6	11,55	Pastagem	Pastagem
49	197355	7497061	Sulco	< 0,5	Encosta	RFP	3545,49	12,39	Pastagem	Pastagem
50	197331	7497133	Sulco	< 0,5	Encosta	RFP	2173,00	11,58	Pastagem	Pastagem
51	197389	7497097	Sulco	< 0,5	Encosta	RFP	3262,41	13,43	Pastagem	Pastagem
52	197452	7497214	Sulco	< 0,5	Encosta	RFP	3062,95	14,83	Pastagem	Pastagem
53	197859	7498117	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>6075,18</td><td>8,81</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	6075,18	8,81	Pastagem	Pastagem
54	197865	7498135	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (5 <e<10)< td=""><td>5646,13</td><td>7,02</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<10)<>	5646,13	7,02	Pastagem	Pastagem
55	198934	7497003	Ravina	1 a 1,5	Drenagem	TFP (2 <e<5)< td=""><td>5857,95</td><td>14,21</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	5857,95	14,21	Pastagem	Pastagem
56	198831	7497627	Ravina	0,5 a 1	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>4094,17</td><td>15,82</td><td>Pastagem</td><td>Pastagem</td></e<5)<>	4094,17	15,82	Pastagem	Pastagem
57	197996	7498365	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>4155,69</td><td>7,7</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	4155,69	7,7	Pastagem	Cana
58	198100	7498393	Sulco	< 0,5	Encosta	TFP (2 <e<5)< td=""><td>7972,79</td><td>6,43</td><td>Pastagem</td><td>Cana</td></e<5)<>	7972,79	6,43	Pastagem	Cana

Legenda

^(*) Posição no relevo; P - Profundidade; M.I. Materiais inconsolidados; A - Área de contribuição; S - Declividade média; Uso - Uso do solo; RFP - Residual formação pirambóia; SA - Sedimentos aluvionares; SC: Sedimentos coluvionares; TFP - Transportado formação piramboia; e - espessura;

5.1.2 Mapas Geológicos-Geotécnicos

Os mapas geológico-geotécnicos foram compilados do trabalho de Gomes (2002) que também desenvolveu sua pesquisa na Bacia do Córrego do Meio, na escala de 1:20.000.

5.1.2.1 Mapa de Landforms

O Mapa de *Landforms* consiste na representação das porções do terreno decorrentes de processos naturais, com base em características próprias do local, como: forma e posição topográfica, frequência e organização dos canais, inclinação das vertentes e amplitude do relevo (LOLLO, 1995).

Gomes (2002) elaborou o Mapa de *Landforms* da Bacia do Córrego do Meio utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, para identificar as especificações do terreno, e trabalho de campo, para confirmação e caracterização das informações analisadas. As unidades de *landforms* foram definidas considerando o tipo de material geológico, relevo e padrões de drenagem. A área em estudo é composta por três sistemas: **A** - área de planalto; **B**

- escarpas com declividades elevadas e sopé de talude com material colúvio e tálus; e C - área de depressão. A Tabela 21 apresenta uma síntese das características das unidades.

Tabela 21 - Características dos sistemas e unidades de landforms.

S ^(*)	$U^{(**)}$	Características
A	-	Planalto com encostas suavemente onduladas e extensas, de topos planos, associados a vales de pequena amplitude e expressão geográfica; drenagem de baixa densidade e sinuosidade mista; materiais laterizados com maior resistência aos processos de intemperismo; presença de feições erosivas do tipo sulco e ravina;
	B1	Encostas íngremes, convexas e retilíneas, associadas a topos irregulares e angulosos; vertentes com perfis retilíneos, e vales dissecados de pequenas amplitudes; baixa frequência de canais de drenagem e sinuosidade mista; presença de queda de blocos de rocha;
В	B2	Encosta do tipo em sequência a escarpa, situada entre as unidades B1 e B3; ausência de cobertura vegetal e textura de relevo; material litológico resistente de textura clara;
	В3	Unidade caracterizada por feições arrasadas, em terreno de declividade moderada a suave; compreende zonas de colúvio e tálus; materiais inconsolidados bastante espesso e do tipo arenoso; moderada frequência de canais de drenagem;
	C1	Unidade com baixa declividade associada à encostas retilíneas e côncavo-convexas, e de topo suavemente arredondado; moderada frequência de canais; presença de sulcos, ravinas e voçorocas às proximidades dos vales; solo susceptível à erosão;
	C2	Formada por colinas amplas, de topos suavemente ondulados, e com vertentes de perfis retilíneos a convexos; baixa densidade de canais de drenagem; presença de ravinas que podem progredir a voçorocas;
	C3	Colinas amplas de topos aplainados, vertentes com perfis retilíneos, declividade muito baixa e canais de drenagem praticamente ausentes; presença de sulcos e ravinas;
	C4	Terrenos baixos relativamente planos, situados as margens de rios sujeitos a inundações periódicas; presenca de ravinas que podem progredir a bocorocas gradualmente;
	C5	Unidade com vales fechados com encostas retilíneas e convexas, associadas às planícies aluviais; média a alta densidade de canais de drenagem com sinuosidade mista; presença de sulcos e ravinas;
	C6	Unidade formada por morrotes com vertentes convexas de topos arredondados a angulosos, e declividade de relevo moderada; canais de drenagem que apresentam uma disposição geométrica especifica, baixa densidade;
С	C7	Colinas associadas à encostas convexas de topos suavemente arredondados; padrão de drenagem de densidade média a alta e sinuosidade mista; presença de cultivo de cana-de-açúcar;
	C8	Unidade de planície aluvial de terreno baixo, as margens de rios sujeitos à inundações; canais de drenagem mais rasos e mais largos; densidade média e sinuosidade mista; presença de margens erodidas devido ação da água fluvial;
	C9	Superfície de relevo com feições arrasadas marcadas pela baixa densidade de drenagem, sinuosidade mista; presença de sulcos e ravinas próximas às redes de drenagem; material inconsolidado pouco susceptível à erosão;
	C10	Colinas pequenas de topos suavemente ondulados, associada as vertentes côncavo-convexa com declividades moderadas; moderada frequência de canais de drenagem;
	C11	Unidade com relevo homogêneo e pequena declividade; presença de feições erosivas do tipo em ravina e voçorocas; colinas médias a grandes topos suavemente ondulados, vertentes com perfis retilíneos a convexos; e declividade baixa, associada a vales fechados;
	C12	Unidade de planícies aluviais, com superfícies próximas as margens do Rio Piracicaba e sujeita a constantes inundações; presença de lagos perenes ou intermitentes; não há presença de feições do tipo ravina e voçorocas.

(*) Sistemas; (**) Unidades.

Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

O sistema C está presente em 87% da Bacia do Córrego do Meio. Das unidades de landforms que compõem este sistema, aquela com maior predominância é a C2 (21,10%), seguida pelas unidades C5 (10,53%) e C6 (10,02%) (Figura 43). As unidades C2 e C5 são constituídas por encostas de perfis retilíneos e convexos, que tendem a ser mais susceptíveis a ocorrência de processos erosivos, por apresentarem maior taxa de solo erodido, além disso, se caracterizam pela presença de feições, do tipo ravinas, que podem evoluir para processos mais complexos, como voçorocas. A Figura 43 apresenta o Mapa de *Landforms* da Bacia do Córrego do Meio.







Figura 44 - Mapa de Landforms da Bacia do Córrego do Meio.

5.1.2.2 Mapa de Substrato Rochoso

A geologia da Bacia do Córrego do Meio é composta por rochas das Formações Itaqueri, Serra Geral, Botucatu e Pirambóia, como pode ser observado na Figura 45.

- Formação Pirambóia: representadas por arenitos finos a médios, de cores variegadas (vermelha, amarela, rosa e branca), siltitos, folhelhos, lamitos e conglomerados. Segundo Gomes (2002), observa-se a presença de estruturas do tipo plano-paralelas, estratificações cruzadas de médio porte, e presença de fraturas subverticais. Esta formação ocorre em 91,4% da área em estudo.
- Formação Botucatu: ocorre ao longo das escarpas e está associada as cuestas basálticas; os arenitos desta formação são de granulometria fina a média, silicificados e de coloração amarela, o que proporciona melhor sustentabilidade ao relevo. Estão presentes em 2,73% da bacia.
- Formação Serra Geral: ocorre também ao longo das escarpas, e de acordo com Gomes (2002) foi constatado a presença de derrames basálticos, de coloração cinza escura e textura afanítica, e diques de diabásio. Em termos percentuais correspondem a 0,75% da área.
- Formação Itaqueri: é composta litologicamente por arenitos grosseiros e conglomeráticos, e seixos de quartzitos de tamanho variado. Esta formação ocorre ao norte da bacia em estudo (5,12%) no alto da Serra de São Pedro.



Figura 45 - Mapa de Substrato Rochoso da Bacia do Córrego do Meio.

5.1.2.3 Mapa de Materiais inconsolidados

O Mapa de Materiais Inconsolidados retrata as diferentes unidades de materiais distinguidas conforme suas características geotécnicas. De acordo com Gomes (2002), a área em estudo é composta por 9 unidades, associadas as formações geológicas e suas diferentes espessuras, dentre estas, na Bacia do Córrego do Meio predominam os materiais Residuais da Formação Pirambóia e os Transportados Associados à Formação Pirambóia (Figura 46).





Os materiais *Transportados Associados à Formação Pirambóia* englobam quase toda a área em estudo, com espessuras superiores a ¹/₂ metro, são muito arenosos e se caracteriza por ser um material altamente susceptível à erosão, fator que pode ser agravado em função de da inclinação dos terrenos e/ou ausência de cobertura vegetal. Estes materiais são constituídos por estrutura porosa, sem cimentação (GOMES, 2002).

Os materiais *Residuais da Formação Pirambóia* apresentam diferentes níveis de alteração, classificados como: saprolíticos e saprólitos. O material residual jovem apresenta textura arenosa fina e baixo potencial erosivo, diferente do residual maduro que tende a ser mais erodível e se caracteriza pela textura areno-argilosa (GOMES, 2002). O Mapa de Materiais inconsolidados da Bacia do Córrego do Meio está ilustrado na Figura 47.



Figura 47 - Mapa de materiais inconsolidados da Bacia do Córrego do Meio.

5.2 Dados de ensaios geotécnicos

Através das informações de ensaios laboratoriais compilados do trabalho de Gomes (2002) foi possível realizar a caracterização geotécnica da área em estudo. A Tabela 22 apresenta uma síntese com os valores máximo, médio e mínimo dos parâmetros geotécnicos por unidade de material inconsolidado e no Anexo A, encontra-se uma tabela com os resultados dos ensaios para todos os pontos amostrados. Destacam-se algumas características por unidades de materiais:

- Formação Itaqueri: arenosos com porcentagem de areia entre 59 e 77%; espessura superior a 2m; predominância de argilominerais de baixa atividade; baixo potencial à erosão (E<1);
- Serra Geral: textura argilo-areno-siltosa; porcentagem de argila entre 12 e 45%, areia entre 30 e 68%, e silte entre 8 e 25%; argilominerais de atividade média; e baixo potencial à erosão (E<1);
- Transportado associado à formação Serra Geral: textura argilo-areno-siltosa; argila entre 36 e 56%, areia entre 20 e 56% e silte entre 7 e 26%; argilominerais de baixa atividade e baixo potencial à erosão;
- Residual da Formação Botucatu: resultam na alteração do arenito; porcentagem de areia entre 84 e 87%; argilominerais de baixa atividade;
- Residual da Formação Pirambóia (Jovem): textura arenosa fina; espessura entre ¹/₂
 e 2m; porcentagem de areia entre 49 e 75%; predominância de argilomineirais de baixa atividade; e baixo potencial aos processos erosivos;
- Residual da Formação Pirambóia (Maduro): textura areno-argilosa; espessura entre ¹/₂ e 2 m; porcentagem de areia entre 66 e 85%; argilomineirais de baixa atividade; maior potencial de erodibilidade nas camadas mais evoluídas;
- Transportado associado à Formação Pirambóia: espessura superior a ¹/₂ metro; materiais arenosos, com textura de areia fina à média, porcentagem de areia entre 79 e 93%; baixa atividade de argilominerias; altamente erodível;
- Materiais coluvionares: textura areia grossa; porcentagem de areia entre 81 e 86%, argilominerais de muito baixa atividade;
- *Materiais aluvionares:* textura areia grossa, porcentagem de areia entre 94 e 96%, baixa atividade de argilominerais.

			GRANULOMETRIA			ÍNDICES FÍSICOS			ENSAIO DO AZUL DE METILENO				ENSAIO DE ERODIBILIDADE		
			Argila	Silte	Areia	ρ_s	ρ_d	e ₀	VB	Acb	CTC	SE	S	Р	E
			(%)		(g/cm ³)	(g/cm ³) (g/cm ³) (g/100		(g/100g solo)	(g/100g argila)	(mEq/100g solo)	(m²/argila)	(%)			
Formação Itaqueri	Residual	Mínimo	12,2	7,1	59,0	2,604	0,941	0,67	0,290	1,171	0,900	7,374	0,55	0,75	2,54
		Médio	19,7	10,4	68,7	2,641	1,335	0,86	0,430	1,480	1,086	18,210	1,09	4,58	24,47
		Máxima	30,0	19,6	77,5	2,672	1,592	0,99	0,896	2,009	1,802	27,134	1,80	11,80	96,00
Formação Serra Geral	Transportado	Mínimo	36,5	7,5	20,6	2,791	0,920	0,89	0,7900	1,2145	2,8653	43,1825	0,12	1,02	4,71
		Médio	46,6	17,5	35,9	2,875	1,145	0,31	1,1176	2,2825	3,9152	74,4797	0,20	1,06	3,29
		Máxima	56,0	26,5	56,0	3,050	1,325	1,89	1,7125	3,9417	5,8290	109,1764	0,68	3,22	8,45
	Residual	Mínimo	12,2	8,7	30,0	2,660	1,096	0,67	0,8962	3,0124	2,8016	21,9279	1,45	0,08	4,23
		Médio	31,9	17,6	50,6	2,801	1,327	1,00	2,1457	7,3628	7,1056	80,3114	2,39	6,89	834,62
		Máxima	45,0	25,0	68,2	2,900	1,592	1,18	4,0200	12,6500	11,3164	137,8941	3,33	13,70	1665,00
Formação Botucatu	Residual	Mínimo	7,0	3,9	84,3	2,613	1,497	0,56	0,1987	2,6120	0,6587	4,0549	-	-	-
		Médio	8,6	5,0	86,3	2,621	1,553	0,67	0,3594	2,8429	1,3090	5,0081	0,35	5,98	2,54
		Máxima	10,5	6,0	87,7	2,629	1,692	0,79	0,5035	2,9917	2,2189	5,9821	-	-	-
Formação Pirambóia	Transportado	Mínimo	5,0	1,4	79,9	2,608	1,503	0,42	0,056	1,407	0,176	1,377	0,22	35,38	0,22
		Médio	10,3	4,1	85,7	2,645	1,547	0,66	0,431	3,916	1,293	10,426	0,68	53,51	0,62
		Máxima	16,2	11,1	93,6	2,699	1,751	0,75	0,970	6,994	2,995	23,965	1,26	77,37	1,66
	Saprolítico	Mínimo	4,3	3,6	66,9	2,602	1,470	0,57	1,785	7,385	5,126	43,664	0,24	2,18	1,26
		Médio	17,3	10,4	73,2	2,643	1,648	0,60	3,319	26,965	9,510	69,323	0,47	5,55	4,87
		Máxima	27,2	21,7	85,0	2,689	1,750	0,67	5,569	84,399	14,282	111,783	0,67	10,52	12,29
	Saprólito	Mínimo	16,8	4,9	49,0	2,603	1,570	0,45	1,681	3,475	2,159	16,664	0,39	0,08	30,89
		Médio	20,9	11,9	67,2	2,641	1,603	0,51	2,858	15,356	6,926	64 ,117	0,50	0,25	156,63
		Máxima	25,3	26,3	78,3	2,673	1,670	0,61	4,852	34,156	13,104	118,720	0,61	0,79	270,18

Tabela 22 - Dados referentes aos materiais inconsolidados presentes na Bacia do Córrego do Meio.

Legenda

ps - massa especifica dos sólidos; ρd - massa específica aparente seca; e₀ - índice de vazios; VB - volume de azul de metileno adsorvido; Acb - índice de atividade da fração fina; CTC - capacidade de troca catiônica; SE - superfície específica; S - índice de absorção d'água; P - perda de peso por imersão; E - índice de erodibilidade.

5.3 Processamento de Dados em SIG

5.3.1 MDE (Modelo Digital de Elevação)

O MDE constitui um dos planos de informação de maior importância, por ser um arquivo base para obtenção dos parâmetros declividade e área de contribuição. Desta forma, buscou-se avaliar não só a consistência hidrológica do modelo obtido, como também a sua resolução espacial, com a finalidade de representar os processos analisados de maneira fidedigna.

Foram gerados três modelos digitais de elevação, com *pixels* de 2, 10 e 30 metros, como pode ser observado na Figura 48. Os valores máximos e mínimos de elevação obtidos foram aproximadamente 930 e 447 metros, respectivamente. Em função do tamanho do *pixel* esses valores apresentaram pequenas variações, que não se refletem tanto no MDE, porém podem ser significativos para a elaboração de outros mapas, como o de declividade.

Nota-se, portanto, que o tamanho do *pixel* interfere na obtenção de outros planos de informação, e consequentemente no seu processamento, uma vez que modelos mais detalhados demandam um melhor desempenho computacional, e maior tempo para processar os dados, o que se deve principalmente ao número de linhas e colunas de cada um dos modelos, conforme apresentado na Tabela 23

Tamanho do <i>pixel</i>	Colunas, linhas
2 <i>m</i>	2579, 8043
10m	516, 1609
30m	172, 536

Tabela 23 - Número de colunas e linhas dos modelos digitais de elevação.

Figura 48 - Modelos Digitais de Elevação (MDE).



5.3.2 Carta de Declividades

A Carta de Declividades consiste na representação cartográfica da inclinação do terreno em graus ou valores percentuais. A declividade é determinada pela diferença de elevação entre dois pontos (dA) e a distância horizontal (dH) entre eles (Figura 49).

Figura 49 - Representação da declividade.



A classe de declividade predominante na Bacia do Córrego do Meio corresponde ao intervalo de 5 a 15%, que de acordo com IG (1993), se caracteriza por terrenos inclinados ou muito inclinados, com relevo ondulado e escoamento superficial rápido, que ocasionam problemas de erosão, que podem ainda ser agravados devido às características geológicas e pedológicas da área, principalmente os solos arenosos. A Figura 50 apresenta a distribuição das classes de declividade em valores percentuais, e as cartas de declividades podem ser observadas na Figura 51.

Figura 50 - Percentual de ocorrência das classes de declividades.





Figura 51 - Cartas de Declividades.

Observa-se que, em função do tamanho dos *pixel*s, alguns valores deixaram de ser representados, principalmente para a carta de declividades com *pixel* de 30m, que apresentou maior variabilidade espacial. Para a carta com *pixel* de 2m o valor máximo obtido foi de 165,51%, que corresponde a 59°, diferente da carta com resolução de 30m, que apresentou valor máximo de 130%, sendo 52°. A Figura 52 apresenta uma parte da área em estudo, de maneira detalhada, evidenciando a interferência da resolução espacial, na distribuição das classes de declividades.





5.3.3 Aspectos Hidrológicos

A análise dos aspectos hidrológicos levou em conta o tamanho do *pixel* (2, 10 e 30 m) e o algoritmo de interpolação. Os mapas de direção de fluxo foram utilizados como parâmetros de entrada para obtenção do fluxo acumulado, que determina as áreas de acúmulo de água em uma determinada região considerando a quantidade de *pixel*s que drenam da jusante para o exutório da bacia. Os valores são expressos em m², pois são calculados *pixel* a *pixel* e leva-se em consideração o sistema de unidade dos parâmetros de entrada.

Verificou-se que o tamanho do *pixel* interfere significativamente nos valores máximos de fluxo acumulado, independente do algoritmo utilizado. Os resultados indicam que quanto menor a resolução, menor será este valor, ou seja, mapas com *pixels* maiores (30 m) deixam de representar zonas de acúmulo de água menores, que por sua vez, correspondem aos canais de primeira ordem da rede hidrográfica. É importante destacar, que a mesma tendência ocorre para os mapas elaborados para áreas menores, por exemplo, sub-bacias.

A Figura 53 apresenta um gráfico com os valores máximos de fluxo acumulado calculados para a Bacia do Córrego do Meio, verifica-se que a distribuição dos dados é semelhante para ambos os algoritmos, no entanto as variações entre os valores máximos tende a ser maior para o D8. Observa-se também que para dados com *pixels* menores (2m) a diferença entre os valores máximos em função do algoritmo não é tão expressiva quanto para os dados com *pixels* (30m).

Figura 53 - Valores máximos de fluxo acumulado para a Bacia do Córrego do Meio em função do tamanho do pixel.



Os Mapas de Fluxo Acumulado obtido pelo algoritmo D8 e D-*Infinity* podem ser obervados na Figura 54 e Figura 55, respectivamente. Os valores de fluxo acumulado estão em escala logarítmica, devido à variabilidade existente em relação à distribuição dos dados, e foram divididos em 6 classes de área de contribuição para melhor visualização dos dados.

Observa-se que tanto para o D8 como o D-*Infinity*, as áreas com as maiores classes de área de contribuição estão localizadas nas porções mais baixas do relevo, nos vales fechados, com alta densidade de canais, enquanto que as classes mais baixas ocorrem nas regiões mais planas, no topo das encostas.

Como descrito por Ramos et al. (2003), a representação do fluxo acumulado com maior precisão está diretamente relacionada com a elaboração de modelos de elevação hidrologicamente consistentes, que indiquem com maior exatidão as direções de fluxo.



Figura 54 - Mapa de Fluxo Acumulado (D8).



Figura 55 - Mapa de Fluxo Acumulado (D-Infinity).

Com a finalidade de verificar a interferência dos algoritmos na análise dos processos erosivos, elaboraram-se os mapas da Figura 56, que mostram uma região da bacia com concentração de feições erosivas (sulcos e ravinas). O mapa obtido pelo método D-*Infinity* apresenta melhores resultados, uma vez que define regiões de fluxo acumulado mais distribuídas e não concentradas como o D8, o que se deve a teoria envolvida na determinação da direção de fluxo. Pode-se constatar também que estas áreas estão relacionadas com as feições existentes, mostrando que as zonas de acumulação de água delimitadas, podem ocasionar o surgimento de processos erosivos.



Figura 56 - Mapas de fluxo acumulado e feições erosivas.

A partir da análise hidrológica podem-se comparar os algoritmos para obtenção dos mapas de área de contribuição. Como constatado por autores como Ramos et al. (2003), verifica-se que o D-*Inifnity* determina as direções de fluxo com maior exatidão, permitindo uma análise mais consistente dos processos erosivos em conformidade com as características do meio físico. No entanto, para confirmar à interferência destes aspectos no limiar de desencadeamento das erosões, realizaram-se outras análises, descritas no próximo item.

5.4 Índice SxA: Sub-bacia dos Alpes e Retiro

A análise das erosões localizadas na Sub-Bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro foi realizada com dois propósitos: avaliar a interferência da resolução espacial na determinação do índice SxA; e comparar os índices obtidos por diferentes algoritmos de mapeamento de fluxo acumulado.

5.4.1 Interferência da resolução espacial na elaboração dos índices

Com a finalidade de comparar o efeito da resolução espacial dos modelos digitais de elevação na obtenção dos mapas de fluxo acumulado e carta de declividade, e consequentemente na relação SxA, realizou-se uma análise considerando 12 feições erosivas localizadas na Sub-bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro.

Determinaram-se as áreas de contribuição (A) e declividade média (S) para cada uma das feições, utilizando os arquivos matriciais obtidos nas etapas anteriores. A igura 57 ilustra as áreas de contribuição para algumas destas feições obtidas com o algoritmo D-*Infinity*. Como descrito no item (5.3.1) a resolução espacial interfere significativamente na representação dos dados, no caso das áreas de contribuição quanto maior o *pixel*, maior o valor destas áreas.



Figura 57 - Áreas de contribuição determinadas pelo D-Infinity com pixels de diferentes tamanhos.

A Figura 58 apresenta o gráfico com a relação SxA, para os dados com diferentes resoluções. Constatou-se que ao propor um limiar para desencadeamento dos processos erosivos a partir dos dados provenientes do MDE (2x2m), é necessária uma área de contribuição menor, o que tende a aumentar de acordo com o tamanho do *pixel*. Especificamente em relação aos dados obtidos pelo MDE (30x30m), as áreas são muito maiores, e como foram geradas por processamento automático podem não estar coerentes com as características reais da área.

Quanto à declividade média, verifica-se que os dados apresentam uma variação menos intensa para os valores médios, o que se deve a distribuição espacial dos dados na Carta de Declividades, todavia estas variações devem ser consideradas, pois a ocorrência dos processos erosivos na área em estudo apresenta forte relação com a inclinação do terreno.

Além disso, analisando o R², obtido pelo ajuste da linha de potência, constata-se que, os parâmetros obtidos por meio dos modelos com resolução de 2x2m apresentam melhor ajuste, evidenciando que, para a representação dos limiares de desencadeamento dos processos erosivos, torna-se fundamental a utilização de dados matriciais, mais precisos, com resoluções maiores.



Figura 58 - Gráfico SxA para os dados processados com pixels de diferentes tamanhos.

Neste contexto, concluiu-se que para a Bacia do Córrego do Meio o MDE 2x2m é o mais propicio para elaboração dos mapas de área de contribuição e declividade. Para avaliação dos limiares de desencadeamento dos processos erosivos, torna-se fundamental a utilização de dados matriciais, mais preciso, com resoluções maiores, conforme citado por Zhang e Montgomery (1994), uma vez que a representação espacial dos fenômenos deve estar em consonância com as características geomorfológicas da área.

5.4.2 Aplicação do D-Infinity para os índices propostos por Araújo (2011)

Para realização desta etapa considerou-se os dois índices propostos por Araújo (2011): canais rasos (<1m) e canais profundos (>1m). Foram utilizados os mesmos pontos de feições

erosivas, no entanto para processamento automático das áreas de contribuição o autor utilizou o algoritmo D8, e no presente trabalho foi utilizado o D-*Infinity*.

5.4.2.1 Canais Rasos

Os canais rasos compreendem 11 pontos de erosão com profundidade menor que 1 metro, localizados em encostas onde predominam os materiais transportados associados à Formação Pirambóia. Nestas áreas ocorre a unidade de *landforms* C5, que se caracteriza por vales fechados com encostas retilíneas e convexas, que por sua vez como descrito por Vilar (1989), estão associadas às maiores taxas de perda de solo. A Figura 59 ilustra algumas destas feições.



Figura 59 - Canais rasos visualizados nas ortofotos.

Ao analisar a situação atual destes canais por meio das imagens de satélite de 2016, verifica-se que, algumas destas feições não estão mais presentes na Sub-bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro, e podem ter sido recuperadas por práticas agrícolas mecânicas. As feições que ainda estão presentes na área estão associadas ao uso agrícola intenso, principalmente a áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

A Figura 60 apresenta o gráfico SxA para os canais rasos. O ajuste do limiar crítico indica que o desencadeamento destas feições está associado a declividades baixas e áreas de contribuição menores. Com base na equação de ajuste, apresentada na Figura 60 para uma área de contribuição de 1ha (10.000m²) a declividade crítica que levaria ao desencadeamento da erosão seria de 5,9% (0,0509 m/m).

Ao definir a linha de tendência com função de potência, que serviu como base para ajuste do limiar crítico, obteve-se o R² de 0,1874. O valor baixo deste coeficiente evidencia que existem outras variáveis associadas, como profundidade dos canais, características geormorfológicas e de uso do solo que podem interferir no processo de desencadeamento das erosões.





5.4.2.2 Canais Profundos

Na análise dos canais profundos foram considerados 18 pontos de feições erosivas, sendo ravinas e voçorocas, localizadas em encostas ou drenagem, com mais de 1 metro de profundidade, semelhantes àquelas ilustradas na Figura 61. Estes canais ocorrem em áreas com predominância de materiais transportados da Formação Pirambóia, e nas unidades de *landforms* C5, que se caracterizam por vales fechados com alta densidade de canais de drenagem, e presença de ravinas.



Figura 61 - Canais profundos visualizados nas ortofotos.

Analisando as imagens de satélite atuais verifica-se que, a maioria destas feições ainda estão presentes na área, e estão associadas às áreas de pastagem e área urbana, onde ocorrem os problemas mais críticos de erosão. Especificamente nas áreas de chacreamento é possível observar que devido à ausência de obras de macrodrenagem nas ruas não pavimentadas o escoamento superficial é direcionado para as erosões, acelerando a ocorrência destes processos.

A Figura 62 ilustra o gráfico SxA para os canais profundos, onde observa-se que o limiar crítico está condicionado a declividade e áreas de contribuição um pouco maiores que o limiar dos canais rasos, o que se deve a maior profundidade destas feições. Aplicando o índice obtido para uma área de contribuição de 1ha (10.000m²) a declividade crítica que levaria ao desencadeamento das erosões seria 7,1% (0,071 m/m).

Desta mesma forma que para os canais rasos, percebe-se também um R² baixo, devido provavelmente a diferentes usos do solo e posicionamento das feições no relevo, visto que algumas estão localizadas em encostas e outras em drenagem.



Figura 62 - Gráfico SxA - Canais profundos.

5.4.2.3 Comparação dos índices em função do algoritmo de fluxo acumulado

A análise comparativa entre os índices SxA foi realizada considerando os dados obtidos por Araújo (2011) e os dados do presente trabalho. Como descrito no item (4.2.4) os pontos de feições erosivas são os mesmos e foram analisados da mesma forma, diferindo apenas com relação aos algoritmos usados para gerar o fluxo acumulado. Destaca-se também, que foi considerada a mesma resolução espacial, de 2x2m, para os parâmetros de entrada.

A Tabela 24 sintetiza os índices para a Sub-bacia do Córrego dos Alpes e Retiro, e também os valores de declividade crítica calculados para uma área de contribuição de 1ha (10.000m²).

Algoritmo	Característica	Índice	Declividade crítica		
90	Canais rasos	S=0,0128A ^{-0,443}	1,28%		
Do	Canais profundos	S=0,0219A ^{-0,376}	2,19%		
D Infinity	Canais rasos	S=0,0590A ^{-0,307}	5,90%		
D-Injinity	Canais profundos	S=0,0709A ^{-0,211}	7,10%		

Tabela 24 - Índices SxA para a Sub-bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro.

Os valores de declividade crítica obtidos para os índices dos canais rasos e profundos apresentaram diferenças significativas. Considerando que as áreas de contribuição foram processadas de maneira automática, para ambos os algoritmos, fica evidente que a escolha do método se reflete na obtenção dos limitares de desencadeamento das erosões.

Para compreender estas diferenças, elaborou-se para as feições 26 e 33 as áreas de contribuição automaticamente utilizando o D8 e o D-*Infinity*. As áreas delimitadas foram sobrepostas nas ortofotos, favorecendo a comparação visual dos resultados dos algoritmos (Figura 63).





Observa-se que as áreas de contribuição definidas pelo D-*Infinity* são maiores e mais condizentes com a topografia e com as características físicas da área, como observado nas ortofotos. Isto mostra que os resultados obtidos com o método D-*Infinity* são mais realistas e permitem a determinação mais acurada das áreas de contribuição e declividades médias.

Outro aspecto importante é o posicionamento do limiar crítico do desencadeamento das erosões no gráfico SxA. Diferentemente de Araújo (2011), ao utilizar o D-*Infinity* para elaboração das áreas de contribuição foi possível realizar o ajuste do limiar crítico com base na linha de tendência, função potência no *software* Excel. Utilizando o D8, Araújo (2011) optou por um posicionamento empírico da reta para obtenção da equação SxA, por não ter sido possível um ajuste matemático adequado.

Na análise comparativa de todos os índices de maneira geral, pode-se constatar que as diferenças entre os algoritmos se refletem sobremaneira na posição do limiar de desencadeamento e no valor de declividade crítica, o que se deve a representação espacial das áreas de contribuição.

5.4.3 Refinamento do Modelo

Como descrito no item anterior ao utilizar o D-*Infinity* foi possível obter alguns ganhos, como o ajuste do limiar crítico e determinação do índice a partir da linha de tendência. No entanto, os valores do R² evidenciaram que existem outras variáveis que devem ser consideradas neste tipo de análise, com a finalidade de se obter índices mais específicos para a área em estudo.

Desta forma, buscou-se analisar de maneira mais detalhada características específicas das feições, levando-se em consideração não só a profundidade dos canais, como também a sua posição no relevo. Como descrito por Guerra (1998), as características relativas ao posicionamento das erosões em encostas atuam em conjunto com os fatores condicionantes, como erosividade da chuva e, propriedades do solo, que promovem maior ou menor resistência à erosão.

Verifica-se que a evolução das feições erosivas na Sub-Bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro, apresenta relação direta conforme a sua posição no relevo, seja em áreas de encosta ou drenagem. Exemplificando, as erosões associadas à rede de drenagem, podem evoluir para processos mais complexos, tornando-se feições de relevo, o que dificultaria o processo de recuperação. Quando não estão conectadas a drenagem, as erosões tendem a ser menos profundas e podem ser recuperadas por práticas mais simples, como manejo agrícola.

Na literatura, autores como Vandekerckhove et al. (1998) analisaram o limiar de desencadeamento para feições divididas em dois grupos com base na localização no relevo: encostas (*straight slope*) ou vales (*hollows*). Neste contexto, decidiu-se fazer uma nova análise dos limiares considerando separadamente as feições erosivas de acordo com sua posição no relevo, sem fazer distinção quanto à profundidade (Figura 64).



Figura 64 - Critérios para classificação das feições.

Todas as feições localizadas na Sub-Bacia do Córrego dos Alpes e Retiro foram subdividas em dois grupos: feições localizadas em encosta, e feições localizadas em drenagem. Para isto, foram analisadas as características das feições, por meio da interpretação das ortofotos (2011) em conjunto com o Mapa de *landforms*.

As feições localizadas em encostas ocorrem em áreas em que predominam os materiais transportados e residuais da Formação Pirambóia, e quanto ao uso e ocupação é representado por áreas de pastagem, cana-de-açúcar e eucalipto. Analisando as características da área em estudo e as imagens atuais, observa-se que estas feições apresentam relação direta com o uso agrícola intenso.

A Figura 65 apresenta o gráfico SxA para os pontos localizados em encosta, onde é possível observar que o limiar crítico está condicionado à declividade e área de contribuição menor. Ao aplicar o índice destas feições para uma área de 1ha $(10.000m^2)$ a declividade crítica que levaria ao desencadeamento das erosões seria de 5,18% (0,0518 m/m).



Figura 65 - Gráfico SxA das feições localizadas em encosta.

As áreas em que ocorrem as feições localizadas em drenagem apresentam as mesmas características geológicas e geomorfológicas, no entanto, a evolução destes canais pode estar associada à interferência antrópica, principalmente porque as maiores feições deste grupo (voçorocas) estão localizadas em área urbana. Ao analisar as imagens de satélite de 2016, constatou-se que estas feições ainda permanecem na sub-bacia, e estão associadas às áreas de pastagem e eucalipto.

Outra característica importante, é que estas feições estão conectadas à rede de drenagem, e por isso podem progredir gradualmente, para processos mais complexos. Estas regiões correspondem às partes mais baixas do relevo, que apresentam as zonas com maior concentração do fluxo acumulado.

A Figura 66 ilustra o gráfico SxA para as feições localizadas em drenagens, verifica-se que a inclinação da reta evidencia que o limiar de desencadeamento está associado a declividades mais elevadas. Aplicando-se o índice obtido para uma área de contribuição de 1 ha (10.000m²) a declividade crítica que levaria ao surgimento destes canais seria de 10,41 % (0.1041 m/m).



Quanto aos valores do R², dos gráficos para os canais em encosta e drenagem, observa-se uma melhoria no ajuste dos dados, pois às condições geomorfológicas (posição no relevo) são mais similares. A Tabela 25 apresenta uma síntese destes valores, juntamente com os resultados das outras análises.

O refinamento dos dados descrito nesta etapa apresentou algumas vantagens em relação à correlação dos dados. No entanto, deve-se considerar que ainda existem outras variáveis envolvidas, como uso e ocupação, que condicionam o desencadeamento destas feições, e por isso devem ser analisadas com mais detalhe.

Característica das feições	R ²
Canais rasos	0,1874
Canais profundos	0,1676
Canais em encosta	0,4982
Canais em drenagem	0,5365

Tabela 25 - Valores do coeficiente de determinação (r²) para diferentes análises, utilizando o D-Infinity.

Verifica-se que, a predição dos processos erosivos, utilizando SxA deve ser realizada ponderando as variáveis existentes, que refletem nos valores dos coeficientes a e b, pois estes, estão relacionados com as características do meio (BEGIM; SCHUMM, 1979 e MONTGOMERY; DIETRICH, 1994). Portanto, a determinação do índice e o ajuste do limiar serão melhores quando analisadas feições com características semelhantes, como localização, geologia, e uso e ocupação.

Considerando os índices obtidos para a Sub-bacia do Córrego dos Alpes e Retiro, verifica-se alguns avanços com o uso do algoritmo D-*Infinity*, como: ajuste do índice e dos

limiares críticos; melhor representação das áreas de contribuição em função da teoria do modelo de direção de fluxo; e valores de declividade crítica mais fidedignos, conforme as características da área em estudo.

5.5 Índice SxA: Bacia do Córrego do Meio

A análise do desencadeamento das erosões na Bacia do Córrego do Meio foi realizada considerando os 35 pontos de feições erosivas mapeados por Araújo (2011) e também os 23 pontos mapeados neste trabalho, totalizando 58 pontos. A determinação dos limiares críticos foi realizada em duas etapas: a primeira fase consistiu na elaboração do índice geral, analisando os pontos mapeados por Araújo (2011) e também aqueles mapeados no presente trabalho; e a segunda análise, mais detalhada, com base na posição dos canais no relevo.

5.5.1 Análise Integrada

Como apresentado no Mapa de Documentação, neste trabalho foram mapeados 23 novos pontos de feições erosivas, no entanto 6 destes estão localizados na região da Serra de Itaqueri (Figura 67), e apresentam condições morfométricas distintas das demais feições localizadas na área.



Figura 67 - Localização das feições na região da Serra de Itaqueri.

A região se caracteriza pela presença de encostas íngremes associadas a topos irregulares e angulosos, particularidade dos sistemas A e B de *landforms*; a geologia é composta por rochas das Formações Pirambóia e Botucatu; e os materiais inconsolidados são

sedimentos coluvionares, materiais conglomeráticos e seixos associados aos arenitos e basaltos.

Além disso, especificamente no sistema de *landforms* "B" ocorrem processos de quedas de bloco e movimentos de massa. A Figura 68 apresenta o perfil topográfico destas encostas, no qual é possível verificar valores altos de elevação, que condicionam este tipo de processo e se refletem significativamente nos parâmetros morfométricos avaliados neste trabalho. Estas características diferem sobremaneira daquelas do restante da área que serviu de base para o desenvolvimento das equações dos limiares de erosão.

Desta forma com base no Mapa de *Lanforms* elaborado por Gomes (2002), optou-se por aplicar os índices apenas para as feições localizadas na região que engloba o Sistema de *landforms* C, uma vez que a aplicação do método apresenta melhores resultados em áreas com características fisiográficas semelhantes. Este sistema corresponde a 80% da área da Bacia do Córrego do Meio, e se caracteriza por apresentar feições associadas às colinas médias e amplas, morrotes alongados e planícies aluviais, e geologia representada pela Formação Pirambóia. Portanto, foram utilizados nesta análise 52 pontos com feições erosivas.



Figura 68 - Perfil topográfico das encostas localizadas na Serra de Itaqueri.

Considerando todas as feições localizadas na Bacia do Córrego do Meio realizou-se a análise integrada com todos dados com a finalidade de definir um limiar crítico geral para a área em estudo. A Figura 69 apresenta o gráfico com todos os pontos localizadas no sistema de *landforms* "C" e o índice SxA para a Bacia do Córrego do Meio.





A declividade crítica que levaria o desencadeamento da erosão para uma área de contribuição de 1ha (10.000m²) com este índice seria de 6,04% (0,0604 m/m), evidenciando que o desencadeamento dos processos na Bacia do Córrego do Meio ocorre em declividades relativamente baixas, portanto existem condições naturais que condicionam a ocorrência da erosão, como geologia e relevo.

O valor do R² (0,3807) relativamente baixo se justifica, pois para esta análise foram consideradas todas as feições da área, que por sua vez apresentam características geomorfológicas e geológicas distintas. O limiar crítico foi ajustado no limite inferior dos dados, paralelamente à inclinação da linha de regressão gerada com a função potência, e se mostrou coerente, pois é possível verificar uma tendência de distribuição dos dados conforme o ajuste realizado.

5.5.1.1 Análise comparativa com os limiares propostos por Dietrich et al. (1992)

O limiar crítico para a área em estudo foi definido por meio do ajuste a partir das linhas de tendência, considerando apenas a relação existente entre declividade média e área de contribuição. Como apresentado na revisão bibliográfica, outra maneira de representar os limiares dos processos erosivos é utilizando o modelo proposto por Dietrich et al. (1992), que

também relaciona área e declividade, no entanto, o posicionamento dos limiares é definido com base em equações que utilizam parâmetros geotécnicos e hidrológicos.

Como forma de avaliar o resultado do índice geral deste trabalho plotou-se o limiar crítico obtido no gráfico elaborado pelos autores citado, como pode ser observado na Figura 70. Verifica-se que o posicionamento do limiar crítico morfométrico (S*x*A) está próximo ao limiar de erosão linear, o que evidencia uma conformidade entre os métodos aplicados, mostrando que a relação estabelecida de maneira empírica está de acordo com as equações propostas pelos autores.

Embora o modelo dos autores tenha sido desenvolvido para condições do meio físico distintas das deste trabalho, percebe-se que há coerência entre os resultados e que seria possível aplicar o método proposto pelos autores, definindo os limiares críticos considerando também os parâmetros geotécnicos e hidrológicos. No entanto, para isso seria necessário a elaboração de um modelo hidrológico consistente, e a realização de ensaios, que permitissem a caracterização dos parâmetros geotécnicos para cada tipo de solo, conforme a escala de estudo. Também se torna fundamental considerar as características dos solos tropicais, principalmente a espessura, de maneira que os parâmetros utilizados estejam em conformidade com as características locais.



Figura 70 - Posicionamento do limiar critico no gráfico de Dietrich et al. (1992).

5.5.2 Análise de acordo com a classificação das feições

Figura 71 - Níveis de detalhamento para elaboração dos limiares críticos.

A análise detalhada do desencadeamento das erosões foi realizada considerando a posição das feições no relevo, conforme os resultados obtidos para a Sub-bacia do Córrego dos Alpes e Retiro. No entanto, considerando as especificidades de algumas feições, realizouse posteriormente uma subdivisão ponderando não só a localização, mas também a profundidade dos canais (Figura 71).



Desta maneira é possível detalhar os limiares dos processos erosivos considerando a posição dos canais no relevo e a profundidade, o que resulta em uma análise conforme os tipos de feições.

5.5.2.1 Erosões em Encosta

Na área em estudo foram mapeados 35 pontos de feições erosivas em encosta, sendo sulcos e ravinas localizadas em áreas de pastagem; cultura anual (cana-de-açúcar); e cultura temporária (eucalipto), algumas destas feições podem ser observadas na Figura 72.

Figura 72 - Feições localizadas em encosta.



Considerando a análise temporal de 2011 a 2017, fica evidente que o surgimento destas erosões está associado a um conjunto de fatores, como manejo agrícola inadequado e períodos de chuva intensa.

A Figura 73 apresenta o gráfico SxA para estas feições. É possível notar que os valores de declividade média para os canais em encostas estão entre 5 e 15%, e as áreas de contribuição são menores que 1 hectare, com exceção de três pontos de feições (*outliers*), que são ravinas com profundidade maiores, localizadas em encostas mais íngremes, que as demais.



Figura 73 - Gráfico SxA para as feições localizadas em encosta da Bacia do Córrego do Meio.

Aplicando-se o índice obtido para uma área de 1 ha (10.000m²) o valor da declividade crítica que levaria ao desencadeamento das erosões seria de 5,39% (0,0539m/m). O ajuste da linha de regressão resultou em um R² de 0,5049, que se mostra satisfatório, considerando as inúmeras variáveis existentes que podem interferir nos processos erosivos.

Para analisar estes canais de forma detalhada e propor limiares críticos mais específicos, dividiram-se estas feições em dois grupos: canais com profundidade menor que 0,5 m, e canais com profundidade entre 0,5 a 1m. O gráfico da Figura 74 apresenta o resultado obtido com esta análise.

Para as feições com menos de 0,5m de profundidade a declividade crítica que levaria ao desencadeamento obtida seria de 5,73%, para uma área de 1ha (10.000m²). Este valor mostra-se coerente, pois as feições analisadas são sulcos localizados em encostas relativamente planas. Enquanto para as feições com profundidade entre 0,5 e 1m, o valor seria

de 6,31%, evidenciando que para o desencadeamento é necessário uma declividade maior, que se justifica, pois são feições do tipo ravinas.

Quanto aos valores do R² o ajuste se mostrou melhor para os canais com profundidade entre 0,5 e 1m. O valor relativamente baixo para os canais com profundidade menor que 0,5m, se justifica, pois o surgimento destes canais apresenta condições muito especificas, como práticas agrícolas e fluxo hídrico não concentrado, desta forma, como citado por Dietrich et al. (1993), a definição dos limiares críticos estão sujeitas a variações locais, que por sua vez, podem não apresentar relação direta com as condições morfométricas.



Figura 74 - Gráfico SxA para as feições localizadas em encosta conforme a profundidade dos canais.

5.5.2.2 Erosões em Drenagem

Os canais localizados em drenagem são 17, sendo feições do tipo ravinas e voçorocas, localizadas em área urbana, área de pastagem, e cultura temporária (eucaliptos), ilustradas na Figura 75.

Como descrito no item (5.4.3) a evolução destes canais apresenta relação direta com a sua localização, as ravinas tendem a evoluir para voçorocas, que podem tornar-se feição de relevo, que por sua vez, comprometem as áreas urbanas e agrícolas, devido as altas taxas de perda de solo.

Feijão nº 2Feijões nº 5, 6, 7 e 8Image: Seija no s

Diferente das feições localizadas em encosta, a declividade média e área de contribuição destas erosões são maiores, ocasionando consequentemente canais maiores em termos de área e profundidade. O gráfico SxA apresentado na Figura 76 revela estes valores.



O índice obtido para uma área de 1 ha (10.000m²) indica uma declividade crítica de 7,48% (0,0748m/m). O R² obtido para a linha de regressão foi de 0,6488, mostrando uma correlação consistente entre os dados analisados. Observa-se, que três pontos de feições (*outliers*) apresentam características distintas das demais, como localização e área de contribuição relativamente maior.

Para propor limiares críticos mais específicos para os canais localizados em drenagem, dividiram-se estas feições em dois grupos: canais com profundidade entre 1,0 a 1,5m, e canais com profundidade superior a 1,5m. O gráfico da Figura 77 apresenta o resultado obtido para está análise.

Figura 75 - Feições localizadas em drenagem.

A declividade crítica de desencadeamento das feições com profundidade entre 1 e 1,5m para uma área de contribuição de 1ha (10.000m²) é de 7,67%. Este valor se deve a localização e ao tipo das feições, que são ravinas e estão situadas em vales fechados com inclinações maiores. Em relação aos canais com profundidade maior que 1,5m, a declividade crítica é de 11,96%, que incide no desencadeamento de voçorocas, localizadas em encostas mais inclinadas, que ocasionam consequentemente maior concentração do escoamento superficial.

Em relação aos valores do R², o ajuste apresentou resultados melhores para os canais com profundidade maior que 1,5m, pois todas as feições analisadas neste subgrupo são decorrentes de intervenção antrópica. Observa-se que o ajuste para as feições com profundidade entre 1,0 a 1,5m foi menor, portanto, conclui-se que para definir características especificas das feições, com a finalidade de melhorar as condições de contorno, se torna necessárias informações mais precisas, que requerem levantamento em campo.



Figura 77 - Gráfico SxA para as feições localizadas em drenagem conforme a profundidade dos canais.

A Tabela 26 sintetiza os principais índices obtidos para a Bacia do Córrego do Meio e os valores de declividade crítica. Os índices obtidos favoreceram a análise do desencadeamento dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio, permitindo a definição de aspectos importantes como, declividade crítica associadas a estes limiares. Tais valores mostraram-se coerentes com as características da área, principalmente com as unidades de *landforms*. A elaboração dos mapas utilizando o algoritmo D-*Infinity* permitiu um melhor ajuste dos dados, o que favoreceu a determinação dos diferentes limiares críticos.

Verifica-se também que, outras características especificas das feições podem ser consideradas para melhorar o ajuste dos dados analisados, no entanto, para que os dados estejam coerentes, se torna fundamental o levantamento de campo, e este trabalho foi realizado com o propósito de obter o maior número de informações possível por meio de dados remotos, como imagens de satélite e ortofotos.

Característica	Profundidade	Índice	S _{crítico}	R ²
Análise integrada	-	S=0,0600A ^{-0,280}	6,04%	0,3807
	-	S=0,0539A ^{-0,412}	5,39%	0,5049
Erosões em encosta	< 0,5m	S=0,0573A ^{-0,230}	5,73%	0,1384
	0,5 a 1 m	S=0,0631A ^{-0,491}	6,31%	0,7191
	-	S=0,0748A ^{-0,397}	7,48%	0,6488
Erosões em drenagem	1 a 1,5 m	S=0,0767A ^{-0,663}	7,67%	0,5908
	> 1,5 m	S=0,1196A ^{-0,383}	11,96%	0,9360

Tabela 26 - Índices SxA para a Bacia do Córrego do Meio.

5.6 Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões com base nos limiares topográficos

A Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões consiste na representação cartográfica das áreas críticas definidas a partir da relação entre a Carta de Declividades e o Mapa de Área de Contribuição. Desta forma, foram elaboradas três cartas: Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões; Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Encosta; e Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Drenagem.

Assim como os índices SxA, as cartas de zoneamento foram elaboradas apenas para a região da bacia que compõem o sistema de *landforms* C, por apresentar características fisiográficas semelhantes. Os demais sistemas (A e B), região da Serra de Itaqueri são compostos por encostas íngremes e terrenos com declividade alta, que desfavorece a aplicação da relação morfométrica para mapeamento das áreas críticas.

5.6.1 Geral

As áreas com possibilidade de ocorrência de feições erosivas laminares do tipo sulcos, ravinas e voçorocas, ocorrem em encostas retilíneas e vertentes convexas, com topos arredondados; e alta densidade de canais, conforme o Mapa de *landforms* (GOMES, 2002). Estas características condicionam zonas de fluxo acumulado e consequentemente o desencadeamento das erosões.

A partir da Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões elaborada pela equação do índice geral (S=0,06 $A^{-0,280}$), verifica-se que as áreas críticas delimitadas espacialmente correspondem a 14,42% da área considerada para aplicação dos índices (*landform* C), e mostram conformidade com os pontos de feições erosivas. Estas áreas ocorrem em vales onde a concentração do fluxo acumulado é maior, que por sua vez estão associados aos terrenos com declividade elevada. Destacam-se as áreas críticas localizadas nas Sub-Bacia dos Córregos dos Alpes e Retiro, como a região com maior concentração em toda a bacia em estudo.

Como citado por Dietrich et al. (1993) e Stabile (2013), os pontos de feições erosivas que não estão próximos das áreas críticas indicam que a elaboração dos índices está sujeita a variabilidade das características das feições, ou seja, o desencadeamento destes canais pode estar relacionado com algumas propriedades especificas, que por sua vez estão relacionadas com os processos de transporte de sedimentos difusos. A Figura 78 apresenta de forma detalhada as áreas críticas e os pontos de feições erosivas.

Figura 78 - Representação detalhada das áreas críticas.



A Figura 79 apresenta a Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões da Bacia do Córrego do Meio. O processamento dos dados em SIG e a expressão utilizada se mostraram coerentes e permitiram a representação espacial dos limites críticos, e consequentemente a identificação das áreas críticas. Como citado por Gutiérrez et al. (2009) estas cartas auxiliam a compreensão dos processos de evolução das feições e podem ser aplicados em conjunto com as técnicas de conservação do solo, auxiliando desta forma o planejamento ambiental da área.



As áreas críticas que condicionam o desencadeamento das erosões em encostas, principalmente sulcos e ravinas, canais com profundidades menores, ocorrem em encostas convexas de topos arredondados e vales fechados, que correspondem às unidades C4, C5 e C7 do Mapa de *Landforms*.

Em termos percentuais as áreas críticas ocorrem em 5,29% da área da Bacia do Córrego do Meio, e estão em conformidade com a maioria dos pontos mapeados, como pode ser constatado na Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Encosta (S=0,0539A^{-0,412}), ilustrada na Figura 80.

Observa-se que estas áreas críticas delimitadas no mapa ocorrem nas regiões onde existem terrenos com declividade moderada que coincidem com as maiores classes do mapa de área de contribuição.

Verifica-se que, para alguns pontos de erosões, não é possível observar áreas críticas no entorno, e sim pequenos canais de fluxo acumulado, isto indica, que o desencadeamento das erosões depende não apenas da declividade e do fluxo acumulado, parâmetros correlacionados na carta, mas também das condições de uso e ocupação e manejo agrícola.

5.6.3 Erosões em Drenagem

As áreas críticas de erosão em drenagem estão localizadas nas margens dos canais e nas unidades de *landforms* com alta densidade de drenagem (C4, C5 e C9). Estas características estão condizentes com os pontos mapeados, que se caracterizam por canais profundos, que podem expandir lateralmente, tornando-se feições de relevo, em uma determinada evolução temporal.

A Figura 81 apresenta a Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Drenagem (S=0,0714A^{-0,397}), em termos percentuais as áreas críticas correspondem a 2,66% da área considerada (*landform* C). Os valores em termos percentuais são baixos, o que se justifica, pois, na elaboração da carta foram correlacionados os parâmetros área de contribuição e declividade, e por isso, as áreas identificadas são apenas as regiões da bacia onde a declividade elevada coincide com as áreas com maior concentração de fluxo.

Assim como na Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Encosta, os pontos que não apresentam áreas mapeadas em seu entorno, indicam que o desencadeamento da feição está relacionado também com aspectos antrópicos, como áreas urbanizadas e ruas não pavimentadas, que acabam direcionando o escoamento superficial para as erosões.




Figura 81 - Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Drenagem.

5.6.4 Comparação das Cartas de Zoneamento com a Carta de Susceptibilidade

A avaliação das Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões definidas com base nas equações dos limiares topográficos foi realizada por meio da confrontação com documentos cartográficos elaborados previamente. Para isto, utilizou-se a Carta de Susceptibilidade à Erosão da Bacia do Córrego do Meio na escala de 1:20.000, elaborada por Gomes (2002).

5.6.4.1 Carta de Susceptibilidade à Erosão

A Carta de Susceptibilidade à Erosão da Bacia do Córrego do Meio foi elaborada por Gomes (2002) a partir dos seguintes atributos do meio físico: *landforms*, materiais inconsolidados, substrato rochoso e declividade. Ponderando estes planos de informação em uma matriz de comparação pareada AHP - *Analytc Hierarchy Process* (SAATY, 1980), a autora definiu cinco classes de susceptibilidade à erosão em função das características do meio físico e sua representatividade, descritas na Tabela 27.

Classes	Características
	Terrenos planos e extensos, que correspondem às unidades A1, C3, C8 e C12.
Muito pouco susceptível	Nestas áreas há presença de cobertura vegetal, que protegem o solo e reduzem o
	gradiente do escoamento superficial.
	Terrenos com baixa declividade e compostos por materiais de baixo índice de
Pouco susceptíveis	erodibilidade. As feições erosivas, do tipo sulcos, surgem devido ao escoamento
	superficial concentrado nas trilhas de animais.
	Ocorrem em terrenos com declividade superior a 5% e materiais com baixa coesão,
Moderadamente	de textura arenosa. Correspondem à porção intermediária da Bacia do Córrego do
moueraaamente	Meio, e as feições erosivas do tipo, sulcos e ravinas surgem devido às condições de
	relevo que favorecem o escoamento superficial concentrado.
	Incidem em áreas próximas as drenagens, em terrenos com inclinação superior a
Suscentíveis	10% e com forte interferência antrópica, que aceleraram os processos erosivos.
Susceptivets	Nestas áreas há ocorrência de feições desde sulcos a voçorocas, devido à ação
	combinada do escoamento superficial e subsuperficial
Muito susceptíveis	Ocorrem em terrenos muito inclinado, localizados próximos as redes de drenagem.

Tabela 27 - Classes de susceptibilidade definidas por Gomes (2002).

A distribuição destas classes para a Bacia do Córrego do Meio em valores percentuais está ilustrada na Figura 82. Observa-se que as classes menos susceptíveis correspondem a 47,4%, e as classes mais susceptíveis estão distribuídas em 52,6% da área, nestas áreas a ocorrência dos processos erosivos, se torna um problema ambiental crítico, devido à extensão das feições.



Figura 82 - Percentual de ocorrência das classes de susceptibilidade.

A Figura 83 apresenta a Carta de Susceptibilidade à Erosão digitalizada no ArcGIS, a partir da carta original produzida por Gomes (2002). Ressalta-se, que existem pequenas diferenças em termos de valores percentuais desta carta com a contabilizada por Gomes (2002) devido ao processo de digitalização do arquivo, no entanto, esta diferença não interferiu nas análises realizadas.

Observa-se que as classes menos susceptíveis ocorrem em terrenos planos, onde há menor interferência das atividades antrópicas. Na porção central da área ocorrem as classes mais susceptíveis, que por sua vez estão associadas a intervenções antrópica, como: desmatamento, áreas urbanizadas, vias de acesso e áreas agrícolas, que em conjunto com as características do meio físico, aceleram ou propiciam a formação dos processos erosivos.





A Figura 84 apresenta uma das feições que ocorrem nas classes susceptível e altamente susceptível. Esta voçoroca se caracteriza como um processo ativo e com presença de *piping* e localiza-se em área de chacreamento. Foi possível verificar em campo que a presença de ruas não pavimentadas e ausência de obras de microdrenagem, favorecem a evolução deste processo.





5.6.4.2 Avaliação das Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões

A avaliação das áreas críticas foi realizada sobrepondo a Carta de Susceptibilidade à Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões (Índice Geral), e contabilizando as áreas coincidentes em termos percentuais, conforme o gráfico da Figura 85. Verifica-se que 68,72% das áreas críticas da Carta de Zoneamento estão em conformidade com as classes mais susceptíveis a erosão, revelando um resultado satisfatório para o método aplicado, que considerou apenas parâmetros morfométricos e determinou de maneira empírica o limiar crítico.

As áreas críticas também apresentam percentual de coincidência com as classes pouco e muito suscetível, no entanto, deve-se ponderar que os atributos e os métodos são diferentes, e que tais diferenças são aceitáveis, frente às inúmeras variáveis que interferem no desencadeamento das erosões.





A Carta de Zoneamento sobreposta a Carta de Susceptibilidade pode ser observada na Figura 86. Observa-se a distribuição das áreas críticas sobre ou próximas às classes mais susceptíveis (altamente, susceptível e moderadamente), estas regiões estão concentradas nas porções do relevo onde existem encostas que propiciam o escoamento superficial concentrado. Todavia, verifica-se que nas classes menos susceptíveis quase não existe sobreposição destas áreas, mostrando mais uma vez a coerência entre estes mapas.



Figura 86 - Carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões sobreposta às classes de susceptibilidade.

Em relação à Carta de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões em Encosta o percentual de área coincidente com as classes altamente, suscetível e moderadamente foi ainda maior, 73,21%, como pode ser verificado na Figura 87.

Observa-se que as características das classes mais susceptíveis, como terrenos com inclinação superior a 5% que condicionam o escoamento superficial concentrado estão em conformidade com o valor da declividade crítica obtida para estes canais, que corresponde a 5,39%.



Figura 87 - Percentual de áreas de ocorrência de erosões em encosta coincidentes com as classes de susceptibilidade.

A Figura 88 apresenta a Carta de Zoneamento de Áreas Ocorrência de Erosão em Encosta sobreposta a Carta de Susceptibilidade. Verifica-se que as áreas críticas e mais susceptíveis ocorrem apenas nas encostas com vales fechados, e que quase não acontecem áreas críticas sobrepostas as classes menos susceptíveis.



Figura 88 - Carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões em encosta sobreposta às classes de susceptibilidade.

As áreas críticas de erosões em drenagem coincidentes correspondem a 73,52% das classes altamente, susceptível e moderadamente, e assim como os canais em encostas, apresentam similaridade entre as características destas áreas (Figura 89).



Figura 89 - Percentual de áreas de ocorrência de erosões em drenagem coincidentes com as classes de susceptibilidade.

A Figura 90 apresenta a Carta de zoneamento e susceptibilidade sobrepostas. Observase que as áreas críticas de erosão em drenagem ocorrem nas margens dos canais, nas zonas com maior concentração de fluxo acumulado. Estas áreas coincidem principalmente com as características da classe susceptível, que são terrenos com maior inclinação, próximos às redes de drenagem. A declividade crítica obtida foi 7,48% e está relativamente próxima à inclinação destes terrenos (10%).



Figura 90 - Carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões em drenagem sobreposta às classes de susceptibilidade.

A confrontação das Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões com a Carta de Susceptibilidade apresentou resultados satisfatórios, com mais de 60% de áreas críticas coincidentes. Isto revela que a relação morfométrica utilizada neste trabalho, para determinação do limiar de desencadeamento das erosões, está coerente com outros produtos cartográficos que foram elaborados para avaliação dos processos erosivos.

Tais resultados demonstram que a Bacia do Córrego do Meio apresenta um percentual significativo de áreas críticas para ocorrência de processos erosivos, em função de características naturais, mas também evidenciou que alguns destes processos estão condicionados a intervenção antrópica.

A presença de áreas críticas de ocorrência de erosões em percentual significativo, em áreas classificadas como de susceptibilidade moderada à erosão por Gomes (2002), demonstra claramente que a intervenção antrópica pode conduzir ao surgimento de erosões em áreas que, mesmo não tendo alta predisposição para ocorrência de erosão, acabam apresentando problemas devido ao uso inadequado do solo. Este aspecto reforça a importância do estudo realizado, que pode alertar o planejador de maneira a evitar usos inadequados nas áreas críticas de ocorrência de erosão e assim impedir a degradação de área e minimizar os danos aos recursos naturais e ao meio ambiente de maneira geral.

Em termos de planejamento ambiental deve-se pensar na recuperação da Bacia do Córrego do Meio, principalmente das feições do tipo voçorocas, evitando a evolução destes processos e o surgimento de novos canais. A presença de erosões tanto em áreas urbanas como agrícolas, comprometem a dinâmica natural da área, ocasionando diversos problemas ambientais, como perda de solo e assoreamento dos recursos hídricos. Quando localizadas em áreas urbanas podem inviabilizar a expansão urbana, desvalorizando estes locais, e também favorecer o depósito de resíduos sólidos dentro das feições, acarretando a contaminação das águas subterrâneas.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo estudar o desencadeamento das erosões lineares localizadas na Bacia do Córrego do Meio - Município de São Pedro - SP, com base na proposição dos índices SxA, determinados com o auxílio de técnicas de geoprocessamento.

6.1 Processamento automático

A acurácia dos modelos digitais de elevação (MDE) elaborados para obtenção dos parâmetros área de contribuição (A) e declividade média (S) está diretamente relacionada com os parâmetros de entrada, que devem estar em escala compatível com o *pixel* de saída, e também digitalizados adequadamente, favorecendo a interpolação e representação das variações topográficas. Quanto à resolução, verificou-se que os modelos com resoluções maiores (2x2m) foram os mais indicados para aquisição dos parâmetros A e S, e permitiram consequentemente a determinação de limiares críticos mais realistas. As áreas de contribuição obtidas a partir de modelos com resoluções menores (30x30m) foram muitos maiores, e por isso não correspondem às características da área.

Em relação aos métodos de aquisição dos mapas de fluxo acumulado (D8 e D-*Infinity*) observou-se que as áreas de contribuição definidas pelo algoritmo D-*Infinity* são mais condizentes com a topografia e com as características físicas da área, permitindo a determinação mais precisa dos parâmetros A e S. A escolha deste algoritmo e os resultados obtidos se refletiram no ajuste do limiar crítico de desencadeamento das erosões, pois favoreceram o ajuste matemático a partir dos pontos inferiores do gráfico SxA, e também na obtenção das equações $S=aA^{-b}$.

Desta forma, foi possível verificar que os diferentes algoritmos de fluxo acumulado interferem sobremaneira na posição e no ajuste do limiar crítico de desencadeamento das erosões. Por isso, ao realizar o processamento automático em SIG torna-se fundamental analisar os algoritmos disponíveis, com a finalidade de selecionar o mais indicado para representação dos parâmetros hidrológicos. Quanto ao *software*, o TauDEM apresentou como vantagem a disponibilidade dos dois algoritmos (D8 e D-*Infinity*) para processamento dos dados hidrológicos; a manipulação dentro da plataforma do ArcGIS 10.3; e sua disponibilidade como *software open source*.

6.2 Índices SxA

O índice obtido a partir da análise integrada de todas as feições da Bacia do Córrego do Meio (58 pontos) foi S=0,060 $A^{-0,280}$. Neste caso a declividade crítica para o desencadeamento da erosão em uma área de contribuição de 1 ha (10.000m²) seria de 6,04% (0,0604 m/m). Este valor, relativamente baixo de declividade para o desencadeamento dos processos erosivos, evidencia que existem condições naturais que condicionam a ocorrência da erosão, como geologia e relevo. Estas características estão em conformidade com outros trabalhos, como Gomes (2002) e Araújo (2011), e mostram que os limiares críticos estão em conformidade com as características da área.

Apesar de ser um modelo de predição simples, pois consideram apenas fatores naturais, área de contribuição e declividade média, os resultados obtidos foram consistentes e auxiliam na compreensão da dinâmica do desencadeamento das erosões lineares em países de clima tropical. Estes dados são importantes, pois podem subsidiar ações de planejamento no âmbito geral, considerando os diferentes tipos de processos erosivos que podem surgir, desde sulcos a ravinas.

Os outros índices obtidos foram determinados a partir da classificação das feições, quanto à posição no relevo. Para os canais localizadas em encosta o índice foi S=0,0539A^{-0,412}, enquanto que, para os canais em drenagem foi S=0,0748A^{-0,397}, os valores de declividade crítica para desencadeamento foram respectivamente 5,39%, e 7,48% (para uma área de contribuição de 1 ha). As diferenças entre os valores evidenciam que, as feições em encostas, do tipo sulcos e ravinas, requerem menor área de contribuição e declividade média para deflagração do processo, diferentemente das feições em drenagem, ravinas mais profundas e voçorocas, que necessitam de maiores áreas e declividades. Os resultados revelam que os mecanismos de desencadeamento são distintos, pois, são influenciados pela dinâmica do escoamento superficial, que pode ocasionar o surgimento de diferentes tipos de feições.

Os limiares críticos mais específicos, obtidos para profundidades menores que 0,5 m $(S=0,0573A^{-0,230})$; entre 0,5 e 1m $(S=0,0631A^{-0,491})$; entre 1 e 1,5m $(S=0,0767A^{-0,663})$; e maiores que 1,5m $(S=0,1196A^{-0,383})$, demonstram que a análise detalhada das erosões quanto ao seu tamanho proporciona melhor ajuste dos dados e permite a análise da área sob diferentes abordagens.

A classificação das feições, seja quanto a posição no relevo ou profundidade dos canais, permitiu uma compreensão mais detalhada dos mecanismos de desencadeamento, e são importantes, pois favorecem o entendimento das outras variáveis que estão associadas ao surgimento destas feições, como práticas de manejo e uso do solo, que por sua vez, interferem ou aceleram a ocorrência destes processos. Desta maneira, as ações de planejamento podem ser aplicadas considerando as especificidades dos diferentes tipos de erosão.

6.3 Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões

Ao implementar as equações $S=aA^{-b}$ no SIG foi possível representar espacialmente os limiares críticos de desencadeamento das erosões, e desta forma, elaborar as Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosão, que indicam as áreas críticas e estáveis na Bacia do Córrego do Meio. As áreas críticas delimitadas mostraram conformidade com a maioria dos pontos de erosões identificados, no entanto, para os pontos que não estão próximos destas áreas, constatou-se que o surgimento destes canais está relacionado com outras variáveis, como uso do solo e intervenção antrópica.

Por fim, a comparação das Cartas de Zoneamento de Áreas de Ocorrência de Erosões com a Carta de Susceptibilidade revelou um percentual de coincidência entre as áreas críticas e susceptíveis acima de 60%, evidenciando que a relação morfométrica, entre os parâmetros A e S, para representação dos limiares críticos está em conformidade com outros produtos cartográficos. Para as áreas não coincidentes, foi possível constatar que o surgimento das feições está condicionado a fatores antrópicos, e por isso, não apresentam relação direta com as características morfométricas.

A partir do desenvolvimento deste estudo, conclui-se que a Bacia do Córrego do Meio apresenta um percentual significativo de áreas críticas para ocorrência de processos erosivos, em função de características naturais. Além dos fatores naturais, constatou-se a forte influência dos aspectos antrópicos, principalmente na área urbana, que ocasionam o surgimento de processos erosivos mais complexos.

Desta maneira, torna-se fundamental a adoção de projetos de recuperação ambiental para a área, com o intuito de minimizar os danos aos recursos naturais e também as perdas econômicas e sociais, visto que algumas feições comprometem as áreas agrícolas e urbanas. As cartas de zoneamento elaboradas neste trabalho poderão auxiliar a execução destes projetos de duas maneiras, a primeira delas, evitando a ocupação inadequada nas áreas críticas de ocorrência das erosões, e a segunda orientando a adoção de medidas (ecológicas, agrícolas, mecânicas ou estruturais) visando à prevenção, controle, mitigação ou recuperação nas áreas afetadas pelos processos erosivos.

Para desenvolvimento de outros trabalhos de mesma natureza, recomenda-se:

- Utilizar modelos digitais de elevação (MDE) hidrologicamente consistentes e com maior resolução para obtenção dos dados área de contribuição e declividade média;
- Aplicação de algoritmos de fluxo distribuído, como o D-*Infinity*, para elaboração dos mapas de área de contribuição;
- Realização de etapas de campo, para levantamento de informações *in loco*, para auxiliar a classificação das feições erosivas, com a finalidade de melhor o ajuste entre os parâmetros A e S;
- Propor índices uma classificação das feições erosivas, com base em outros fatores condicionantes como uso do solo (estágio inicial da feição) e geologia;
- Consolidar os modelos de predição para as condições dos países tropicais, com base nas equações propostas por Dietrich et al. (1992) a partir de parâmetros hidrológicos e geotécnicos.

- ABERA, W.; ANTONELLO, A.; FRANCESCHI, S.; FORMETTA, G.; RIGON, R. The uDig Spatial Toolbox for hydro-geomorphic analysis. Geomorphological techniques, cap. 2, p. 1-19, 2014.
- ALMOROX, A. J.; BERMUDÉZ, F. L.; RAFAELLI, S. La degradacion de lós suelos por erosion hídrica: métodos de estimacion. Murcia: Universidade de Murcia, 2010. 384p.
- ARAUJO, T. P. de. Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/ SP. 2011. 181 p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- AUGUSTO FILHO, O. Análise de métodos de interpolação de modelo digital de terreno e aplicação em SIG de gestão de riscos geotécnicos e ambientais em oleodutos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, 13., 2011, São Paulo. Anais... São Paulo: 2011, p. 1 - 9.
- AUGUSTO FILHO, O. Sistema de informações geográficas aplicados à engenharia ambiental. In: CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C. Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 643 - 667.
- BARROW, C. J. Land Degradation. In: BARROW, C. J. Erosive soil degradation. Reino Unido: Cambridge University, 1991. p. 199-219.
- BEGIM, Z. B.; SCHUMM, S. A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment. Transactions of the Asae, v.22, p. 347 350, 1979.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.
- BOSQUILIA, R. W. D. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de drenagens e nascentes. 2014. 136p. Dissertação, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2014.
- BRASIL. Lei Nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 26 jan. 2016.
- CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. F.; POVINELLI, J. Sustentabilidade: um desafio da gestão dos recursos hídricos. São Carlos: EESC USP, 2010. 80 p.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento em projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998, 190 p.
- CBPE Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Planos das bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 a 2020 – Relatório Síntese. Cobrape: Neoband Soluções Gráficas, São Paulo, 2011, 128p.
- CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. In: OLIVEIRA, A. M.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998, Cap 14. p. 227-241.

- CEPAGRI Centro de Pesquisas Metereológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. Disponível em: < http://www.cpa.unicamp.br/outrasinformacoes/clima_muni_566.html>. Acesso em: mar. 2016.
- CHAVES, M. A. Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica. 2002. Tese. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: UFV, 2002.
- COSTA-CABRAL, M.; BURGES, S.J. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water **Resources Research**, v. 30, p. 1681-1692, 1994.
- CROSTA, A. P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.
- DAEE Departamento de água e energia elétrica. **Banco de Dados Hidrológicos**. Disponível em http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/Default.aspx?dadosorigem=Fluviom%C3%A9tric os&ugrhi=UGRHI&cidadeugrhi=PIRACICABA%2FCAPIVARI%2FJUNDIAI&prefix oposto=4D-007>. Acesso em: mar. 2016.
- DAEE Departamento de água e energia elétrica. Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo. 1:250.000. DAEE/IG/IPT/CPRM: 2007.
- DANTAS-FERREIRA, M. Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação – Córrego do Tucum (São Pedro/SP). 2004. 171 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- DANTAS-FERREIRA, M. Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas. 2008. 447 f. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- DANTAS-FERREIRA, M.; PEJON, O. J. Análise temporal das feições erosivas lineares: São Pedro. In: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 5, 2004.
 Anais... São Carlos, 2004. p. 131 - 139.
- DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; BAUER, J. M. R. Erosion thresholds and land surface morphology. **Geology**, v. 20, p. 675 679, 1992.
- DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 2, n. 1, p. 29 77, 2012.
- ESRI. ArcGIS: Tools. Disponível em: < http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/tools/a-quick-tour-of-geoprocessing-tool-references.htm>. Acesso em: marc. 2017.
- FACINCANI, E. M.; CAVALHEIRO, F. Boçorocas: aspectos da reabilitação por revegetação na região de São Pedro, SP. **Revista Geociências**, v.14, n. 2, p. 269-275, 1995.

- FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage network from a digital elevation model. Water Resources Research. v.25, p. 709-717, 1991.
- FARINASSO M.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS - Equação universal de perdas de solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba - PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 73-85, 2006.
- FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. Drenagem e controle da erosão urbana. Curitiba: Champagnat, 1997. 486 p.
- FITZ, P. R. Geoprocessamento sem Complicação. São Paulo: Oficina de Texto, 2008, 160 p.
- FREEMAN, T. G. Calculating catchement area with divergent flow based on a regular grid. **Computers & Geosciences.**v. 17, n. 13, p. 413-422, 1991.
- FUREGATTI, S. A. Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ. 2012. 467 p. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- GARCIA, G. J. Sensoriamento remote: princípios e interpretação de imagens. Nobel: São Paulo, 1982. 357 p.
- GOMES, D. M. Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na Bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/SP, na escala 1:20.000. 2002. 242 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- GRANDO, A. Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental. 2011. 175 p. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA; A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 149 - 199.
- GUIMARÃES, C. N. Mapeamento geotécnico da Bacia Córrego da Barra, aplicação do penetrômetro de impacto em estudos de processos erosivos São Pedro - SP - Escala 1:10.000. 2008. 104 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- GUTIÉRREZ, A. G.; SCHNABEL, S.; CONTADOR, F. L. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in Sw Spain. Land Dregadation & Development, v. 20, p. 535 550, 2009.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, n.106. p. 211–232, 1989.

- HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia, 1988.
- IBGE **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=3550407>. Acessado em: mar 2016.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de Biomas do Brasil 1:500.000. IBGE/MMA: 2004.
- IF Instituto Florestal do Estado de São Paulo. **Mapa Florestal dos municípios do estão de São Paulo: São Paulo: São Pedro 1:200.000**. IF/ESALQ/UNICAMP: 2001.
- IG Instituto Geológico do Estado de São Paulo. Mapeamento do uso e cobertura do solo da UGRHI 5 (PCJ) - 1:25.000. CPLA/IG/IGC: 2013.
- INFANTI JR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 131-152.
- IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo -1:500.000. USP/IPT: 1981.
- JORGE, F. N.; UEHARA, K. Águas de superfície. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. p. 101 109.
- KUWAJIWA, J. I. Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e estimação de assoreamento no reservatório do Lobo (Itaripina/Brotas/SP). Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- LAL, R. Soil erosion in the tropics: principles and management. New York: Mcgraw-Hill, 1990, 580p.
- LAL, R. Soil erosion research methods. Florida: St. Lucie Press, 1994. 340 p.
- LEA, N. L. An aspect driven kinematic routing algorithm. In: Parsons, A.J.; Abrahams, A. D. **Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics,** 1992, p. 374-389.
- LOLLO, J. A. O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração de mapeamento geotécnico: sistematização e aplicação para quadrícula de Campinas (SP). 1995. 246 p. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- MACHADO, C. J. S. A gestão francesa de recursos hídricos: descrição e análise dos princípios jurídicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 4, p. 37-47, 2003.
- MAGRI, R. A. F. Análise da suscetibilidade à erosão da região do Médio Rio Grande (MG). 2013. 202 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

- MAPEIA SÃO PAULO Sistema de Visualização de Dados. Disponível em: http://www.mapeiasp.sp.gov.br/Login>. Acesso em: out.2016.
- MENÉNDEZ-DUARTE, R.; MARQUÍNEZ, J.; FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, S.; SANTOS, R. Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting. Catena, v. 71, p. 267 - 278, 2007.
- MITCHELL, A. Getting started with ArcGIS. USA: ESRI, 1999, 253 p.
- MONTGOMERY, D.; DIETRICH, W. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. In: Kirkby, M. J (Ed). **Process models and theoretical geomorphology**. Chichester: Wiley, 1994, p. 221-246.
- MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. Inglaterra: Longman Group, 1986. 298 p.
- NAZARI SAMANI, A.; AHMADI, H.; JAFARI, M.; BOGGS, G.; GHODDOUSI, J.; MALEKIAN, A. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal Wastershed). Journal of Asian Earth Sciences, v. 35, p. 180-189, 2009.
- NETTO, M. M.; SOBREIRA, F. G. Os processos erosivos lineares da bacia hidrográfica do Ribeirão Carioca, Itabirito/MG e seus condicionantes principais: observações preliminares. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 13 21, 2006.
- NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Edgard Blücher, 1992, 308 p.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage network from digital elevation data. **Computer vision, graphics image process**, v. 28, p. 323-344, 1984.
- O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water resources research**, v. 22, n. 5, p. 794 804, 1986.
- OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. A.; SILVA, M. L.; CURI, N.; KLINKE NETO, G.; FREITAS, D. A. F. Development of topographic factor modeling application in soil erosion models. In: Soriano, M. C. Soil process and current trends is quality assessment. Croatia: InTech, 2013, p. 111 - 138.
- OLIVEIRA; J. B.; PRADO, H. Carta Pedológica Semi-Detalhada do Estado de São Paulo - 1:100.000. Folha Piracicaba - SF-23-Y-A-IV. IAC/IFC: 1989.
- PATTON, P. C.; SCHUMM, S. A. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomeno. **Geology**, p. 88-90, 1975.
- PEJON, O. J. Mapeamento geotécnico regional da folha de piracicaba SP (Escala 1:100.000: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos. 1992. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Mapeamento geotécnico regional na escala 1:100.000 considerações metodológicas. **Revista IG**. p. 23 29, 1995.

- PMSP Prefeitura Municipal de São Pedro. Plano Municipal de Saneamento Básico de São Pedro – Sistema de Abastecimento de água. PROESPLAN: Engenharia, São Pedro, v. 1, 2013, 229 p.
- PMSP Prefeitura Municipal de São Pedro. **Site oficial da Prefeitura de São Pedro /SP**. In: http://www.saopedro.sp.gov.br/sao-pedro. Acessado em: mar.2016.
- POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Revista Estudos Avançados**. v. 22, p. 43- 60, 2008.
- QUINN, R.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. Hydrological processes. v. 5, p. 59-79, 1991.
- RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; FERNANDESE, N. F.; GOMES, R. A. T. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 4, p. 41-49, 2003.
- RANIERI, S. B. L. Avaliação de métodos e escalas de trabalho para determinação de risco a erosão em bacias hidrográficas utilizando sistema de informação geográfica (SIG). 1996. 128 p. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, 1990. São Paulo: 1990, p. 1 27.
- ROTTA, C. M. S.; ZUQUETTE, L. V. Processos erosivos. In: ZUQUETTE, L. Geotecnia ambiental. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, p. 115-152.
- RUHE, R.V. Geomorphology: geomorphic processes and surficial geology. Boston: Houghton Mifflin Company, 1975. 246p.
- SAATY, T. L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw Hill. 1980.
- SALOMÃO, F. X. T.; CANIL, K.; RODRIGUES, S. P. Exemplo de aplicação da geologia de engenharia no controle preventivo e corretivo dos processos erosivos. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 2, n. 2, p. 39 - 56, 2012.
- SALOMÃO, F. X. T.; IWASA, O. Y. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: BITAR, O. Y (Coord). Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. São Paulo: ABGE IPT, 1995, p. 5-148, 1995.
- SANTORO, J. Erosão Continental. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geólogico, 2009, p. 53 70.

- SANTOS, I. Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais -PR. 2001. 93 f. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- SILVA, A. F. Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego Tuncum, São Pedro - SP, Escala 1:10.000. 2003. 131 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- SILVA, S. F. Avaliação das alterações ambientais na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão do Piçarrão, Campinas – SP. 2000. 138 f. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- SOBREIRA, F. G. Cartas geotécnicas em áreas sujeitas a escorregamentos. In: Simpósio brasileiro de cartografia geotécnica e geoambiental, 5, 2004, São Carlos: 2004, p. 151 - 153.
- SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 79-97, 2012.
- SORENSEN, R.; SEIBERT, J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. **Jornal of hydrology**, v. 347, p. 74-89, 2007.
- SOUZA, N. M.; CELESTINO, V. R. R. Contribuição à análise de decisões em cartografia geotécnica com uso de geoprocessamento: sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica. In: Simpósio brasileiro de cartografia geotécnica e geoambiental, 2004. São Carlos: 2004, p. 509 - 515.
- SOUZA, N. M.; GANDOLFI, N. Geoprocessamento para a cartografia geotécnica. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7, 1993. Poços de Caldas: ABGE, 1993, p. 25 - 31.
- STABILE, R. A. Limites topográficos de feições erosivas lineares em Piratinga (SP). 2013. 103p. Dissertação. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.
- TAUDEM. **Hydrology Research Group.** Disponível em: < http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/help53/DInfinityContributingArea.html>. Acesso em: Mar. 2017.
- TORRI, D.; POESEN, J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. **Earth-Science Reviews**, v. 130, p. 73-85, 2014.
- TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p.24-35, 2006.
- TURCOTTE, R.; FORTIN, J. P.; ROUSSEAU, A. N.; MASSICOTE, S.; VILLENEUVE, J.P. Determination of the drainage structure of a watershed using digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of hydrology**, n. 240, p. 225-242, 2001.

- VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: Florenzano, T. G. Geomorfologia, conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de texto, 2008, p. 72-104.
- VANDAELE, K.; POESEN, J.; MARQUES SILVA, J. R.; GOVERS, F.; DESMET, P. Assessment of factors controlling ephemeral gully erosion in Southern Portugal and Central Belgium using aerial photographs. Z. Geomorph. N. F., v. 41, p. 237-287, 1995.
- VANDAELE, K.; POESEN, J.; GOVERS, G.; WESEMAEL, B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomomorphology**, v. 16, p. 161 173, 1996.
- VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D., FIGUEIREDO, T. Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. **Catena**, v. 33, p. 217-292, 1998.
- VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; WIJDENES OOSTWOUD, D.; NACHTERGAELE, J.; KOSMAS, C.; ROXO, M. J.; FIGUEIREDO, T. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. Earth Surface Processes and Landforms. v. 25, p. 1201-1220, 2000.
- VANWALLEGHEM, T.; POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. Geomorphology, v. 69, p. 76-91, 2005.
- VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M. Indentificação e mapeamento dos processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Caeté, no município de Alfredo Wagner/SC. Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 15, n. 1, p. 22-33, 2014.
- VILAR, O. M. Modelo matemático para a erosão dos solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v. 13, p. 381 385, 1989.
- VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. Erosão dos Solos. In: CINTRA, J. C.A; ALBIERO, J. H. (Org.). Solos do interior de São Paulo. São Paulo: ABMS, 1993, v. 1, p. 177-206.
- WALSH, L. Digital Topography: Should you choose a TIN or *raster* interpolation of the landscape?. The University of Maryland, Geology Department.2017. Disponível em: http://serc.carleton.edu/vignettes/collection/42681.html. Acesso em: Fev. 2017.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. Transactions of the American Geophysical Union. v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses A guide to conservation planning. U. S. Departamento of Agriculture. Agriculture Handbook, n. 537, 1978.
- XAVIER DA SILVA, J. O que é geoprocessamento?. Revista do CREA RJ, p. 42-44, 2009.
- XUJIONGXIN, J. Beggang erosion: the influencing factors. Catena, v. 27, p. 249-263, 1996.
- YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista administração pública**, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.

ZACHAR, D. Soil Erosion. New York: Elsevier, 1982. 548 p.

- ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrological simulations. Water resources research, v. 30, n. 4, p. 1019-1028, 1994.
- ZUQUETTE, L. V. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras. 1987. Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.
- ZUQUETTE, L. V. Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia de elaboração. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, A. R.; YAMANOUTH, G. R. B. Feicões erosivas na bacia do córrego Espraido, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972-2002. Revista Brasileira de Geociências, v. 37, n. 2, p. 414-425, 2007.
- ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. Cartografia geotécnica. São Paulo: Oficina de Texto, 2004, 190 p.
- ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J.; SINELLI, O.; GANDOLFI, N. Mapeamento geotécnico da cidade de Franca (SP), Brasil - Escala 1:25.000: Carta de riscos à erosão. Revista Geociências. v. 14, n. 2, p. 41-58, 1995.

ANEXO A

X	Y	Ponto	Unidade	% Argila	% Silte	% Areia	ρs	рd	e ₀	VB	Acb	CTC	SE	S	P	E
196837	7500213	2A	Pb-Transp	5.0	1.4	93.6	2.627	-	-	0.056	1.656	0.176	1.377	-	-	-
196837	7500213	В	Pb-Transp	10.4	3.0	86.6	2.663	-	-	0.200	1.922	0.625	4.891	-	-	-
196837	7500213	С	Pb-Transp	5.9	8.0	86.1	2.663	-	-	0.200	3.390	0.6	4.900	-	-	-
196837	7500213	D	Pb-Transp	8.3	3.2	88.5	2.612	-	-	0.188	2.261	0.587	4.592	-	-	-
196808	7497694	3	Pb-Rsd-I	12.1	7.2	80.7	2.691	-	-	4.569	37.788	14.282	111.783	-	-	-
196808	7498235	5	Pb-Transp	13.5	3.2	83.3	2.699	-	-	0.401	2.974	1.255	9.822	-	-	-
197914	7498025	6	Pb-Transp	13.9	2.2	83.9	2.638	-	-	0.376	2.706	1.176	9.202	-	-	-
199060	7496382	7A	Pb-Rsd-I	24.6	3.6	71.8	2.613	-	-	1.817	7.386	5.679	44.453	-	-	-
199060	7496382	7B	Pb-Rsd-II	16.8	4.9	78.3	2.607	-	-	1.713	10.196	5.354	41.917	-	-	-
197093	7494328	8	Pb-Rsd-II	17.2	7.8	75.0	2.603	-	-	2.406	13.991	6.522	58.877	-	-	-
197080	7494924	9	Pb-Rsd-I	4.3	21.7	75.0	2.602	-	-	3.629	84.399	11.345	88.793	-	-	-
197485	7492480	10A	Z-Aluv	2.6	3.4	94.0	2.610	-	-	0.319	12.280	0.998	7.812	-	-	-
197485	7492480	10B	Z-Aluv	2.0	1.4	96.6	2.630	-	-	0.423	12.378	0.701	8.758	-	-	-
194519	7504045	1	Pb-Transp	11.4	3.6	85.0	2.633	-	-	0.970	6.994	2.995	23.965	-	-	-
194548	7504175	2A	Z-Colv	1.9	8.1	90.0	2.649	-	-	0.250	6.139	0.48	4.108	-	-	-
194548	7504175	2B	Z-Colv	11.5	3.5	85.0	2.617	-	-	0.413	6.134	0.454	3.401	-	-	-
194567	7500397	4	Pb-Transp	6.5	8.5	85.0	2.669	-	-	0.150	2.310	0.469	3.674	-	-	-
195159	7497957	5A	Pb-Transp	8.7	2.7	88.6	2.608	-	-	0.504	5.787	1.574	12.319	-	-	-
195153	7497909	5B	Pb-Rsd-I	27.2	5.1	67.7	2.653	-	-	2.344	8.617	7.326	57.344	-	-	-
198564	7492360	7	Pb-Rsd-II	19.6	5.4	75.0	2.637	-	-	1.681	3.475	2.129	16.664	-	-	-
196602	7501797	8	Pb-Transp	5.9	11.1	83.0	2.645	-	-	0.154	2.608	0.481	3.764	-	-	-
196810	7502181	9	Pb-Transp	10.5	2.5	87.0	2.636	-	-	0.451	4.099	1.410	11.032	-	-	-
196997	7500304	1A	Pb-Transp	5.0	1.4	93.6	2.627	1.532	0.74	0.056	1.656	0.176	1.377	0.64	51.01	0.5
196997	7500304	2B	Pb-Transp	5.9	8.0	86.1	2.663	1.618	0.65	0.200	3.390	0.6	4.900	0.64	38.3	0.67
196997	7500304	2C	Pb-Transp	8.3	3.2	88.5	2.612	1.751	0.48	0.188	2.261	0.587	4.592	0.59	57.03	0.41
196803	7497929	5	Pb-Rsd-I	12.2	7.6	80.2	2.689	1.612	0.67	4.414	36.180	13.798	108	0.29	9.17	1.26

X	Y	Ponto	Unidade	% Argila	% Silte	% Areia	ρs	ρd	e ₀	VB	Acb	CTC	SE	S	P	E
197982	7501759	8	Pb-Transp	6.0	10.8	83.2	2.630	1.529	0.72	0.166	2.758	0.581	4.049	0.53	33.38	0.64
197041	7497318	3	Pb-Rsd-I	16.7	10.3	73.0	2.654	1.689	0.57	1.785	10.687	5.579	43.664	0.67	2.18	12.29
197276	7497416	4	Pb-Rsd-I	16.0	9.0	85.0	2.646	1.686	0.59	3.980	24.875	12.441	97.377	0.24	6.43	1.49
197921	7498031	8	Pb-Transp	13.9	2.2	83.9	2.638	1.558	0.69	0.376	2.706	1.176	9.202	0.22	25.38	0.35
199019	7497761	9	Pb-Transp	16.2	2.5	81.3	2.635	1.631	0.71	0.553	3.410	1.729	13.530	1.26	30.37	1.66
199118	7495675	15	Pb-Rsd-II	24.7	26.3	49.0	2.608	1.590	0.49	4.852	19.645	8.168	118.720	0.51	0.12	170
195001	7497945	2	Pb-Transp	15.9	2.6	81.5	2.632	1.535	0.75	0.504	3.404	1.720	13.490	1.39	30.79	1.81
195163	7497944	3	Pb-Transp	13.6	3.4	83.0	2.628	1.538	0.74	0.950	6.984	2.969	23.238	0.55	67.2	0.33
195627	7495252	5A	Pb-Rsd-I	25.6	7.5	66.9	2.685	1.691	0.61	3.160	35.456	10.444	76.220	0.48	3.25	5.91
195627	7495252	5B	Pb-Rsd-II	23.1	11.6	65.3	2.658	1.583	0.5	1.852	12.370	5.606	64.754	0.55	0.08	270.18
194854	7506793	1	SG-Rsd	43.9	21.0	35.1	2.750	1.490	1.02	4.020	12.650	11.316	137.894	3.33	0.08	1665.00
195391	7506181	2	Itq-Rsd	20.2	9.6	70.2	2.660	1.509	0.79	0.396	1.726	1.086	17.970	1.80	0.75	96.00
195130	7507155	3	Itq-Rsd	30.0	9.0	61.0	2.604	1.409	0.85	0.453	1.511	1.417	11.093	1.19	3.21	14.83
194301	7506429	4	Itq-Rsd	15.0	7.5	77.5	2.610	1.402	0.86	0.301	2.009	0.942	7.374	0.55	5.93	3.71
195081	7503873	7	Pb-Transp	15.9	4.2	79.9	2.639	1.557	0.75	0.504	1.407	0.711	3.490	0.49	73.94	0.27
195346	7501435	9	Pb-Transp	12.3	2.2	85.5	2.668	1.658	0.69	0.539	5.205	1.571	12.722	0.38	68.07	0.22
197351	7504795	10	Bt-Rsd	8.4	3.9	87.7	2.613	1.630	0.56	0.376	2.925	2.219	5.982	0.38	5.98	2.54
195179	7497903	12	Pb-Transp	13.6	3.4	83.0	2.628	1.538	0.74	0.950	6.984	2.969	23.238	0.68	75.49	0.36
195002	7497935	1	Pb-Transp	13.0	3.5	83.5	2.627	1.530	0.74	0.896	5.970	2.519	18.671	0.68	75.49	0.36
195676	7495268	2A	Pb-Rsd-I	25.3	6.7	68.0	2.658	1.690	0.61	4.359	34.156	10.438	66.212	0.46	0.08	230.00
195676	7495268	2B	Pb-Rsd-II	21.1	16.6	62.3	2.671	1.580	0.50	2.524	13.570	6.506	74.756	0.61	0.79	30.89
195512	7494383	3A	Pb-Transp	8.4	2.5	89.1	2.672	1.530	0.64	0.169	5.671	0.192	18.671	0.75	45.96	0.65
195512	7494383	3B	Pb-Rsd-I	20.0	7.7	72.3	2.630	1.470	0.60	3.485	28.241	7.069	45.817	0.43	4.40	3.91
195512	7494383	3C	Pb-Rsd-I/II	22.6	21.5	55.9	2.637	1.750	0.57	4.048	18.605	9.691	52.427	0.48	2.88	6.67
197119	7494928	4A	Pb-Rsd-I	4.7	17.2	77.6	2.602	1.640	0.57	3.961	14.249	11.345	48.793	0.67	10.52	2.55
197119	7494928	4B	Pb-Rsd-II	2.1	21.4	76.5	2.658	1.570	0.45	4.263	18.491	13.104	88.793	0.39	0.19	82.11
195735	7505644	5	Itq-Rsd	21.0	12.0	59.0	2.610	1.150	0.92	0.290	1.290	0.900	21.002	0.750	11.80	2.54
197147	7504708	2A	SG-Transp	36.5	7.5	56.0	2.804	1.140	0.89	0.790	1.215	2.865	43.183	0.120	1.02	4.71

X	Y	Ponto	Unidade	% Argila	% Silte	% Areia	ρs	рd	e ₀	VB	Acb	CTC	SE	S	P	E
197147	7504708	2B	SG-Transp	49.0	12.5	38.5	2.791	1.325	1.42	0.998	2.522	4.013	97.250	0.68	3.22	8.45
197147	7504708	2C	SG-Transp	56.0	23.4	20.6	2.853	1.196	1.89	1.713	3.942	5.829	109.176	-	-	-
197049	7504802	3	Bt-Rsd	7.0	6.0	87.0	2.620	1.497	0.67	0.199	2.612	0.659	4.987	-	-	-
196910	7504954	4	SG-Transp	45.0	26.5	28.5	3.050	0.920	1.02	0.097	1.451	2.954	48.310	-	-	-
196765	7505463	5	SG-Rsd	28.5	12.5	59.0	2.842	1.096	0.98	1.163	3.012	7.249	53.110	-	-	-
196472	7505687	6	SG-Rsd	35.0	18.5	46.5	2.793	1.213	1.18	3.562	5.752	9.098	98.038	-	-	-
196831	7505675	7	SG-Rsd	45.0	25.0	30.0	2.900	1.470	1.01	2.220	11.901	7.600	121.002	1.45	13.70	4.23
196632	7505727	8	SG-Rsd	12.2	19.6	68.2	2.660	1.592	0.67	0.896	7.346	2.802	21.928	-	-	-
196122	7506326	10	Itq-Rsd	17.3	7.1	75.6	2.668	1.340	0.95	0.322	1.307	1.097	20.971	1.16	2.41	19.25
197115	7494303	12A	Pb-Rsd-I	21.7	5.8	72.5	2.616	-	-	2.641	17.095	5.126	57.214	-	-	-
197115	7494303	12B	Pb-Rsd-II	23.0	6.7	70.3	2.635	-	-	2.073	12.309	4.504	46.357	-	-	-
198963	7498612	8	Pb-Transp	10.2	2.5	87.3	2.680	1.505	0.56	0.316	2.759	1.157	9.204	-	-	-
198578	7495549	20	Pb-Transp	11.3	3.4	85.3	2.670	1.581	0.42	0.852	5.903	2.519	18.647	-	-	-
197919	7502292	22	Pb-Transp	9.4	2.5	88.1	2.652	1.503	0.51	0.572	5.725	2.590	12.840	-	-	-
195512	7507230	7	Itq-Rsd	12.2	19.6	68.2	2.660	1.592	0.67	0.896	7.346	2.802	21.928	0.55	5.93	3.71
195682	7506869	10	SG-Rsd	26.5	8.7	64.8	2.861	1.102	1.12	1.014	3.515	4.569	49.897	-	-	-
197401	7504592	12	Bt-Rsd	10.5	5.2	84.3	2.629	1.692	0.79	0.504	2.992	1.050	4.055	-	-	-
198238	7492469	10	Pb-Transp	10.2	3.3	86.5	2.673	-	-	0.797	6.947	0.729	14.965	-	-	-
195425	7506879	12	Itq-Rsd	22.5	8.3	69.2	2.672	0.941	0.99	0.352	1.171	1.060	27.1338	1.60	2.05	31.22

Legenda

ps - massa especifica dos sólidos; ρd - massa específica aparente seca; e₀- índice de vazios; VB - volume de azul de metileno adsorvido; Acb - índice de atividade da fração fina; CTC - capacidade de troca catiônica; SE - superfície específica; S - índice de absorção d'água; P - perda de peso por imersão; E - índice de erodibilidade.