

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**MÉTODOS DIGITAIS DE OBTENÇÃO DE LIMIARES
TOPOGRÁFICOS DE PROCESSOS EROSIVOS A PARTIR DE
PRODUTO DE RADAR**

ANA FLÁVIA DE ROLAND PADILHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. José Augusto de Lollo.

São Carlos
2020

Padilha, Ana Flávia de Roland

Métodos digitais de obtenção de limiares topográficos de processos erosivos a partir de produto de radar / Ana Flávia de Roland Padilha. -- 2020.
103 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: José Augusto de Lollo

Banca examinadora: Osni José Pejon, Vandoir Bourscheidt

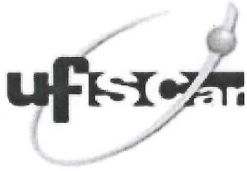
Bibliografia

1. Erosão Linear. 2. Limiar Topográfico. 3. MDE do radar Alos/Palsar. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Ana Flávia de Roland Padilha, realizada em 29/04/2020:



Prof. Dr. José Augusto de Lollo
UNESP



Prof. Dr. Osni Jose Pejon
USP



Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) José Augusto de Lollo Osni Jose Pejon, Vandoir Bourscheidt e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



Prof. Dr. José Augusto de Lollo

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Augusto de Lollo por me apresentar um tema tão importante, pela orientação e discussões durante o desenvolver da pesquisa.

Ao professor Vandoir Bourscheidt pela colaboração na pesquisa e em artigos desenvolvidos em conjunto, sempre solícito auxiliando no ArcGIS.

Ao professor Reinaldo Lorandi pela disponibilização de materiais essenciais no desenvolvimento do projeto, além da colaboração durante etapa de campo.

Ao professor Luiz Eduardo Moschini pela oportunidade da monitoria e pelas ajudas e discussões de geoprocessamento.

Ao professor Osni Pejon pelas contribuições e esclarecimentos técnicos.

A grande amiga que ganhei Monique Neves, muito obrigada por tanta ajuda no desenvolvimento deste trabalho, desde ensinamentos e discussões metodológicas, companhia em trabalho de campo e monitoria, até aos ótimos conselhos.

Aos amigos do Laboratório de Geoprocessamento, pelas contribuições, momentos descontraídos e todo apoio durante este período.

Aos meus pais Angélica e João e minha irmã Ana Júlia por todo o incentivo, carinho e paciência de sempre.

Ao meu namorado e parceiro André, pelo estímulo e apoio em todos os momentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Dentre as vertentes dos estudos de processos erosivos, encontra-se a proposição de limiares topográficos, cujo modelo baseia-se em uma relação inversa entre área de contribuição (A) e declividade média (S), variáveis condicionantes do escoamento superficial para originar a erosão. O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo sobre o processo de formação das erosões lineares, utilizando como base de dados o MDE obtido do radar Alos/Palsar. A área de estudo foi a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano (BHRP), localizada nos municípios de Descalvado, Analândia e São Carlos (SP). As cabeceiras dos processos erosivos foram identificadas em imagens aéreas do ano de 1988, visto serem os registros mais antigos encontrados. Alguns resultados apontam que o modelo oriundo do radar não está livre de ruídos e erros que possam afetar a extração adequada de informações, sendo necessário um tratamento inicial. Para isso, foram testadas diferentes estratégias de tratamento utilizando a ferramenta *Focal Statistics*, do software ArcGIS 10.5, visando à obtenção dos parâmetros morfométricos relacionados aos processos erosivos de forma mais consistente. Os tratamentos também foram aplicados para o MDE produzido com a Carta Topográfica do IGC em algumas áreas na bacia, a fim de analisar se o MDE do Alos/Palsar poderia ser utilizado como alternativa da carta. Em análise de correlação entre os parâmetros A e S, obtidos de ambas as bases de dados, pôde-se determinar o tratamento mais adequado para a bacia, além de evidenciar a capacidade do MDE do radar Alos/Palsar em substituir a Carta Topográfica, facilitando os estudos de limiar topográfico, escassos em nosso país. Utilizando o devido tratamento, foi aplicado o Índice SxA para duas sub-bacias dentro da BHRP, visto maiores concentrações de processos erosivos dentro da mesma unidade geológica (Piramboia). Os índices obtidos foram $S = 0.0371A^{-0.4}$ na sub-bacia 1 e $S = 0.0297A^{-0.376}$ na sub-bacia 2, os quais se mostraram em conformidade com o limiar topográfico de outros trabalhos realizados no Brasil, em locais com características semelhantes de geologia e uso do solo, cujos autores utilizaram como base o MDE da Carta Topográfica. Assim, o produto de radar se mostrou eficiente dentro do estudo de análise do limiar topográfico, fundamental na compreensão da dinâmica da formação dos processos erosivos como auxílio nas ações de planejamento territorial.

Palavras-chave: Erosão linear, limiar topográfico, MDE, Alos/Palsar.

ABSTRACT

Among the aspects of the studies of erosive processes, there is the proposition of topographic thresholds, given by an inverse relationship between contribution area (A) and slope (S), which conditions the surface runoff to cause gully initiation. The aim of this work was the study in the onset of gully erosion, using Alos/Palsar data. The study area was the watershed of the Ribeirão do Pântano, located in municipalities of Descalvado, Analândia e São Carlos (São Paulo state). The gully heads were identified in aerial images from the year 1988, as they are the oldest records found. Results indicate that the model from the radar is not free from noise and errors that may affect the proper extraction of information, requiring an initial treatment. For that, different treatment strategies were tested using the Focal Statistics tool, from ArcGIS 10.5 software to obtain morphometric parameters related to erosion processes in a more consistent way. The treatments were also applied to the Topographic Map data in some areas in the watershed, in order to analyze whether the radar data could be used as an alternative to the map. A correlation analysis between parameters A and S, obtained from both databases, it was possible to suggest the most proper treatment for the watershed, in addition to evidencing the ability of the Alos / Palsar to replace the Topographic Map, facilitating topographic threshold studies, which are scarce in our country. Using the treatment, the SxA index was applied to two sub-watersheds on the BHRP, with the higher concentrations of erosion processes on the same geological formation. The index obtained from the analysis in sub-watershed 1 was $S = 0.0371A^{-0.4}$, and in sub-watershed 2 was $S = 0.0297A^{-0.376}$, which were shown to be in accordance with the topographic threshold of other works carried out in Brazil, in places with similar characteristics of geology and land use, whose authors used Topographic Map data. In summary, the radar product proved to be efficient in the study of topographic threshold, which is fundamental in understanding the dynamics of the formation of erosive processes as an aid in territorial planning actions.

Keywords: Gully erosion, topographic threshold, DEM, Alos/Palsar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da contribuição de A e S para a formação do processo erosivo.	16
Figura 2 - Representação esquemática da combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.....	21
Figura 3 - Gráfico SxA para erosões lineares e laminares no Colorado.	25
Figura 4 - Representação esquemática da contribuição de A e S para a formação do processo erosivo.	26
Figura 5 - Gráfico SxA para diferentes conjuntos de dados.....	28
Figura 6 - Influência da resolução (tamanho do pixel) nas áreas de contribuição.	33
Figura 7 - Bandas do espectro de micro-ondas usado para SAR.....	41
Figura 8 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano.....	44
Figura 9 - Mapa de Substrato Rochoso da Bacia do Ribeirão do Pântano.....	47
Figura 10 - Mapa de Pedologia da Bacia do Ribeirão do Pântano.	52
Figura 11 - Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia do Ribeirão do Pântano nos anos de 1988 e 2018.	56
Figura 12 - Etapas adotadas no desenvolvimento do trabalho.	59
Figura 13 - Representação da forma de definição das cabeceiras dos processos erosivos.	60
Figura 14 - Representação da direção de fluxo pelo método D_{∞}	63
Figura 15 - Etapas do processamento das áreas de contribuição utilizando o TauDEM...	63
Figura 16 - Representação do processamento da ferramenta Focal Statistics com raio circular.	66
Figura 17 - Mapa de Documentação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano.....	68
Figura 18 - Mapas Hipsométricos da BHRP em cada tratamento do MDE do Alos/Palsar.	69
Figura 19 - Análise de tratamento inicial dos MDE provenientes do radar Alos/Palsar e da Carta Topográfica.	71
Figura 20 - Cartas de declividade a partir do MDE do radar Alos/Palsar.	74
Figura 21 - Mapa de fluxo acumulado a partir do MDE do radar Alos/Palsar.	75
Figura 22 - Detalhes do fluxo acumulado com os tratamentos no MDE do radar Alos/Palsar.....	76
Figura 23 - Localização das áreas delimitadas para a análise de correlação.	77

Figura 24 - Gráficos relacionando o parâmetro A (ha) de acordo com o tratamento do MDE: 1) sem tratamento inicial; 2) com tratamento utilizando o Focal Statistics de 5 pixels; 3) com tratamento utilizando o Focal Statistics de 10 pixels.....	78
Figura 25 - Gráficos relacionando o parâmetro S (%) de acordo com o tratamento do MDE: 1) sem tratamento inicial; 2) com tratamento utilizando o Focal Statistics de 5 pixels; 3) com tratamento utilizando o Focal Statistics de 10 pixels.....	80
Figura 26 - Localização das sub-bacias delimitadas para a aplicação do índice SxA.....	82
Figura 27 - Gráfico SxA para a Sub-bacia 1.	83
Figura 28 - Gráfico SxA para a Sub-bacia 2.	84
Figura 29 - Processos erosivos identificados em 1988 e ainda presentes em 2018.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das feições erosivas.....	19
Tabela 2 - Aspectos envolvidos nos processos erosivos.	22
Tabela 3 - Valores dos parâmetros (<i>a</i> e <i>-b</i>) obtidos nos últimos anos.....	27
Tabela 4 - Métodos de obtenção dos limiares topográficos desenvolvidos nos últimos anos.....	28
Tabela 5 - Características dos sistemas orbitais com SAR.....	41
Tabela 6 - Resumo das características morfológicas da Bacia do Ribeirão do Pântano. ..	50
Tabela 7 - Trabalhos anteriores realizados na Bacia do Ribeirão do Pântano.	57
Tabela 8 - Materiais e softwares utilizados.	58
Tabela 9 - Classes de declividades e suas características.....	64
Tabela 10 - Configurações adotadas no processamento com a ferramenta Focal Statistics.	65
Tabela 11 - Valores de altitude (m) da BHRP de acordo com o tratamento do MDE do Alos/Palsar.....	70
Tabela 12 - Áreas em hectares (ha) das áreas de contribuição.....	72
Tabela 13 - Valores de <i>S</i> média da BHRP de acordo com o tratamento do MDE do Alos/Palsar.....	73
Tabela 14 - Valores de R^2 da correlação Carta Topográfica x Alos/Palsar para os parâmetros.	81
Tabela 15 - Correlação dos coeficientes obtidos nesta pesquisa com os de outros autores.	85
Tabela 16 - Áreas em hectares (ha) das áreas de contribuição.....	88

LISTA DE SIGLAS

BHRP	Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
PIB	Produto Interno Bruto
R ²	Coefficiente de Determinação
REM	Radiação Eletromagnética
SAR	Radar de Abertura Sintética
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UTM	Universal Transverse Mercator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Bacia hidrográfica.....	13
2.2 Processos erosivos	14
2.2.1 Definição.....	14
2.2.2 Classificação das erosões.....	15
2.2.3 Suscetibilidade à erosão e fatores condicionantes	20
2.3 Limiares topográficos	23
2.3.1 Definição e parâmetros	23
2.3.2 Métodos de obtenção dos parâmetros.....	28
2.3.3 Aplicação em outros estudos	34
2.4 Geoprocessamento	36
2.4.1 Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	37
2.4.2 Sensoriamento Remoto	38
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.1 Localização	43
3.2 Clima.....	46
3.3 Vegetação	46
3.4 Substrato Rochoso	47
3.6 Geomorfologia	49
3.7 Pedologia	51
3.8 Aspectos hidrológicos.....	55
3.9 Uso e ocupação do solo	55
3.10 Trabalhos anteriores.....	57
4. MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1 Materiais	58
4.2 Métodos	58
4.2.1 Definição da área de estudo.....	59
4.2.2 Compilação dos dados	59
4.2.3 Definição e caracterização das erosões.....	60
4.2.4 Processamento do MDE a partir da Carta Topográfica	61

4.2.5 Seleção do MDE proveniente do radar	61
4.2.6 Processamento dos parâmetros A e S	62
4.2.7 Aplicação da ferramenta de suavização no MDE.....	65
4.2.8 Índice SxA	66
5. RESULTADOS	67
5.1 Documentos Cartográficos	67
5.1.1 Mapa de Documentação	67
5.2 Processamento do MDE	69
5.2.1 Tratamento inicial do MDE	69
5.2.2 Carta de Declividade.....	73
5.2.3 Mapa de Fluxo Acumulado	74
5.3 Análise de Correlação	76
5.3.1 Área de Contribuição	78
5.3.2 Declividade	79
5.4 Índice SxA	81
5.4.1 Análise comparativa com outros autores	84
5.5 Panorama atual dos processos erosivos da BHRP.....	86
6. CONCLUSÕES	88
6.1 MDE do radar Alos/Palsar	88
6.2 Índice SxA	89
6.3 Evolução dos processos erosivos na BHRP.....	90
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1. INTRODUÇÃO

A conformação dos espaços urbanos no Brasil caracterizou-se por um processo acelerado, sendo marcado por irregularidades na forma de uso e ocupação do solo. Em diversos municípios, pode-se observar a falta de planejamento, que, aliada aos locais com alta suscetibilidade a desastres, levam à ocorrência de diversos fenômenos, tais como a erosão. A erosão do solo é um processo natural de transporte de massa, causada por ventos e chuvas (MARTINI et al., 2006), que, em virtude das atividades antrópicas, é classificada como a maior causa de degradação do solo em todo o mundo (VALENTIN et al., 2005).

Como consequências deste processo, acidentes podem ser originados, resultando em impactos negativos aos meios físico e biótico, com grandes perdas econômicas. Martini et al. (2006) ressaltam como principal adversidade o transporte de sedimentos nos corpos hídricos, o que reduz a qualidade da água e provoca o assoreamento dos rios. Além disso, pode causar mudanças na paisagem natural, como também atingir a população local, em casos de deslizamento de terra em regiões habitadas.

Com isso, é fundamental a identificação de fatores físicos que levam à formação dos processos erosivos, a fim de se evitar as inúmeras consequências. As medições de erosão feitas em campo demandam grandes investimentos, tanto de equipe técnica, financeira e mesmo tempo. Em contrapartida, atualmente existem simulações e modelos digitais capazes de armazenar e manipular os dados da paisagem, realizando operações matemáticas para verificar hipóteses (GURGEL et al., 2011).

Segundo Valentin et al. (2005), o estudo de erosões é um processo complexo e, portanto, muitas vezes negligenciado. Dentre as razões destaca-se sua natureza tridimensional, em que o número de fatores e processos relacionados são elevados; a necessidade de buscar a história antecedente da ocorrência da erosão, que se apresenta como um dos fatores da origem; e a rapidez em tomar grandes dimensões, o que torna o controle custoso, seja em questões técnicas ou financeiras.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) apresentam-se como importantes ferramentas na avaliação da capacidade do ambiente e, especificamente em relação às áreas de suscetibilidade à erosão, entram como auxílio fundamental para o planejamento do uso do solo (FARIA, 2003). Além disso, o SIG torna possível a análise integrada entre diversos dados do meio físico, como geomorfologia, declividade, hidrografia, vegetação, uso do solo, a fim de se entender a dinâmica do ambiente frente à ocupação do território (DONHA et al., 2006).

De acordo com Martínez-Casasnovas (2003), no passado a modelagem de erosão linear era baseada em modelos quantitativos e empírico-estatísticos. Nos dias de hoje, com o auxílio da modelagem digital, é possível prever a área limiar de contribuição e outros efeitos topográficos que interferem na iniciação, distribuição e localização dos processos erosivos em diferentes condições. Diversas pesquisas utilizam técnicas de sensoriamento remoto, como a interpretação de fotos aéreas, sendo consideradas de grande potencial na coleta de dados para mapear a erosão, monitorar seu crescimento e calcular a produção de sedimentos.

Assim, o presente trabalho apresenta um estudo sobre a formação dos processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano – SP, em que a metodologia utilizada aborda, além dos componentes ambientais, as condições iniciais das erosões. Tal método, realizado em ambiente SIG, consiste em verificar os limiares do relevo que originaram tais processos. Tendo em vista os benefícios em utilizar a modelagem digital, a pesquisa se faz inovadora pelo uso de um Modelo Digital de Elevação proveniente de radar para gerar os parâmetros declividade (S) e área de contribuição (A) para as feições erosivas da bacia, a fim de se delimitar o limiar crítico.

O método do limiar topográfico concebido por Patton e Schumm (1975) ainda é pouco aplicado no país, justificando a importância de se desenvolver pesquisas na área, principalmente por se tratar de um ambiente tropical, em que a perda de solos por erosão é elevada. Além disso, Araujo e Pejon (2015) afirmam que os resultados obtidos para o limiar topográfico são únicos para cada região, tendo em vista as diferenças ambientais e uso da terra, ressaltando a necessidade de se determinar os limiares em diversos locais.

Dessa forma, torna-se relevante a avaliação do limiar topográfico, levando em consideração as informações ambientais e geotécnicas já existentes em outros trabalhos, a fim de oferecer um instrumento de suporte aos gestores para aplicar medidas preventivas e mitigadoras aos impactos relacionados aos processos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o uso de um Modelo Digital de Elevação obtido de dados de radar, para a obtenção dos limiares do relevo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano, no que tangem à formação de processos erosivos lineares. Em decorrência, tem-se como objetivos específicos:

- Correlacionar os parâmetros área de contribuição (A) e declividade média (S) obtidos a partir do MDE oriundo do radar Alos/Palsar e do MDE da Carta Topográfica;
- Estabelecer os limiares topográficos dos processos erosivos, para sub-bacias da área de estudo, relacionando os índices A e S;
- Analisar a evolução e comportamento das feições erosivas, entre os anos de 1988 e 2018.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bacia hidrográfica

Segundo Porto e Porto (2008), a bacia hidrográfica representa uma área de captação da água da precipitação, cujo escoamento tende a convergir para um ponto de saída, ou seja, o exutório. Tal delimitação é composta por uma rede de drenagem e um conjunto de superfícies vertentes que influenciam o escoamento, desde a nascente até o leito final, com características hidrológicas, geomorfológicas e ecológicas em comum. Assim, é possível delimitar bacias e sub-bacias, cuja interconexão são os sistemas hídricos.

Ao tratar a bacia como unidade territorial, é necessário um entendimento além de uma área natural de escoamento, visto que apresenta interferências que modificam a dinâmica do sistema, advindas de causas biológicas, sociais, culturais e políticas (SCHUSSEL e NASCIMENTO NETO, 2015). Dentre os fatores que alteram o equilíbrio hidrológico de uma bacia hidrográfica, destacam-se a variabilidade climática, captações de água, barragens e principalmente o uso do solo.

De acordo com Barrow (1998), o planejamento e gestão do ambiente, considerando como âmbito a bacia hidrográfica, têm sido usados desde a década de 30, com várias técnicas em diferentes países. Schussel e Nascimento Neto (2015) apresentam um panorama histórico do Brasil, cuja gestão por bacia foi concretizada pela Lei nº 9.433, de 1997, denominada Política Nacional de Recursos Hídricos. O território brasileiro é dividido em primeiro nível em doze Regiões Hidrográficas Brasileiras, de acordo com as similaridades ecossistêmicas, econômicas e sociais. Já o estado de São Paulo, é dividido em 22 unidades de gestão hidrográficas (UGRHI), sendo estas subdivididas em unidades menores, a fim de facilitar o diagnóstico e monitoramento ambiental.

Para Barrow (1998), existem quatro componentes importantes para uma gestão bem-sucedida: o sistema de pesquisa (considerando os dados disponíveis e a

compreensão da estrutura da bacia e atividades existentes); o setor público (agências/órgãos responsáveis); o setor privado (provedor de financiamento e atuante na exploração de recursos); e participação comunitária (as pessoas locais devem estar cientes da situação e possíveis consequências). Porém, é clara a dificuldade em se lidar com essa complexidade, visto que, em sua maioria, se diferencia da divisão administrativa de órgãos de saneamento, instituições ligadas à atividade agrícola e outros.

As diversas alterações humanas realizadas na paisagem resultam em fatores que levam à degradação do local, como a supressão da vegetação, redução da infiltração no solo, formação de processos erosivos, contaminação por insumos agrícolas e efluentes urbanos e industriais. Assim, torna-se fundamental compreender que qualquer atividade (natural ou antrópica) realizada dentro da área da bacia atua na qualidade e quantidade dos mananciais e, por consequência, nos demais elementos (SCHUSSEL e NASCIMENTO NETO, 2015). Cabe ressaltar que, o planejamento engloba atividades que embora localizadas dentro da bacia de drenagem, podem envolver interferências além das águas (BARROW, 1998).

É visto que diversos estudos acadêmicos adotam a bacia como unidade de planejamento, em variados temas, com o objetivo de auxiliar os tomadores de decisão no planejamento ambiental. Portanto, visando à conservação dos recursos naturais, o uso das bacias como unidade para análise apresenta-se como um instrumento de aceitação global.

2.2 Processos erosivos

2.2.1 Definição

A evolução dos processos erosivos se faz integrante da história da civilização, tendo em vista que, no Brasil, a expansão de práticas agrícolas de regiões de clima temperado para as regiões tropicais promoveu o surgimento das grandes erosões (PEJON et al., 2013). De acordo com Ellison (1950), o princípio básico de uma erosão é o processo de destaque e transporte dos materiais do solo, em virtude de uma ação combinada de diversos fatores. Após a desagregação, as partículas se espalham e são transportadas até serem depositadas em outro lugar.

O processo erosivo pode ter origem tanto natural (acelerado por mudanças climáticas ou atividades tectônicas), quanto humana. As interferências humanas podem provocar alterações do equilíbrio natural, que, para se estabilizarem, dão origem às erosões no solo. Bocco (1991) aponta que a maior parte dos processos ocorre em eventos

de moderada magnitude e frequência, já que os eventos extremos são raros e, uma vez acontecidos, podem ser irreversíveis.

A erosão acelerada do solo, em virtude do crescimento urbano, foi levantada em diferentes localidades como causadora de grandes danos à infraestrutura, com consequências na qualidade da água. O mesmo fenômeno também é citado em áreas de expansão do Brasil, principalmente nas alterações das redes de drenagem naturais (ZOLEZZI et al., 2018). Assim, é visto que o desenvolvimento das erosões modifica a configuração da paisagem, carregando grande carga de sedimentos para os cursos d'água (POESEN et al., 2003).

Em relação ao domínio, Poesen et al. (2003) afirmam que os estudos existentes se concentram nas dinâmicas em escalas locais, deixando com menor importância as possíveis implicações em escalas maiores. Corroborando isto, as técnicas de prevenção e controle dos processos são raramente adotadas em maior escala espacial, justamente pelo desconhecimento de benefícios quanto ao aumento de produtividade (VALENTIN et al., 2005).

Independente do âmbito, as erosões apresentam-se como evidências morfológicas dos impactos ambientais que existiram na paisagem, tais como o uso da terra e eventos climáticos extremos. Assim, o estudo de tais fenômenos é essencial para esclarecer interações do homem com o ambiente em tempos remotos, não só para reconstruir a história do local, mas para entender seu funcionamento e, então, evitar futuros eventos (POESEN, 2011).

2.2.2 *Classificação das erosões*

2.2.2.1 Erosão Hídrica

Os tipos de erosão existentes são determinados a partir de seus agentes causadores, sendo eles: vento, gelo e principalmente a água. Dentre as diferentes fontes de água que condicionam os processos, ressalta-se: água de rios (erosão fluvial), água de mares (erosão marinha), água de lagos (erosão lacustre) e água de chuva (erosão pluvial).

A água da chuva é a mais representativa na expansão dos processos erosivos e apresenta ainda maior importância nas regiões tropicais, tendo em vista o aumento do escoamento superficial. Assim, a erosão hídrica é a responsável pela formação dos maiores processos existentes no Brasil, como consequência do manejo inadequado das águas pluviais (PEJON et al., 2013). Trata-se de um processo complexo, influenciado por

fatores como: quantidade, intensidade e duração da chuva, natureza do solo, declividade do terreno e cobertura vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

Porém, ressalta-se que, se a combinação de inclinação do terreno e acúmulo de escoamento forem inadequados para a formação de erosão, a mesma não ocorrerá independente do uso do solo e o evento de chuvas. Do mesmo modo, condições topográficas adequadas para a iniciação de voçorocas não conduzem sistematicamente a um assoreamento, tendo em vista a necessidade de um evento específico que permita a confluência do escoamento. Assim, o uso da terra e as condições climáticas são fatores que explicam o fato de a erosão ultrapassar o limiar topográfico (MAUGNARD et al, 2014a).

A Figura 1, apresentada por Vandekerckhove et al. (2000), mostra uma divisão teórica da paisagem em termos de declividade (S) e área de contribuição (A), que corrobora o caráter determinante de eventos climáticos na posição dos limiares topográficos (limiar de saturação, de escorregamento e de fluxo terrestre). Com isso, conhecendo a localização das cabeceiras de erosão, é possível prever a resposta da paisagem ao clima e às mudanças no uso da terra.

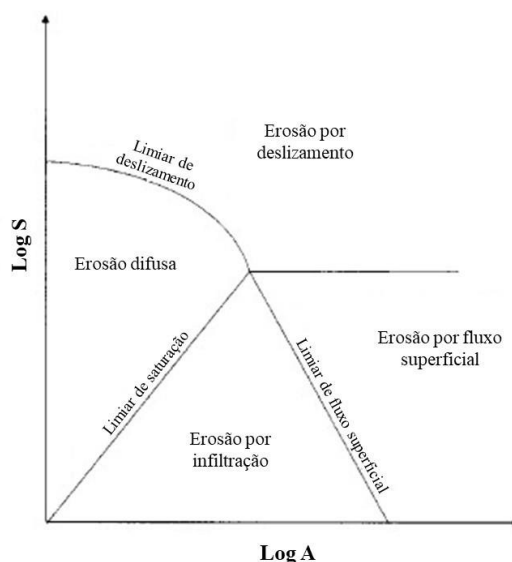


Figura 1 - Representação esquemática da contribuição de A e S para a formação do processo erosivo.

Fonte: Adaptado de Nyseen et al. (2002).

O processo das erosões hídricas envolve diversos mecanismos que atuam em conjunto, desde a ação da gota de chuva no solo, em que a água irá infiltrar ou

condicionar a um escoamento superficial carregando as partículas; ou ainda a ação do escoamento subsuperficial. Em virtude da importância de tais fatores, além de a erosão hídrica ser o enfoque desta pesquisa, os mecanismos serão detalhados abaixo.

- *Splash*

Conhecida como erosão por respingo, representa o impacto da queda das gotas de chuva no solo, propiciando o destacamento das partículas. Nesse evento de destaque, são considerados como fatores importantes o tamanho das gotas e velocidade da queda, além do tamanho das partículas e estabilidade dos agregados (ARAÚJO, 2011).

De acordo com Ellison (1950), no momento em que a gota pinga no solo, partículas do mesmo são esguichadas para o sentido do escoamento, sendo arrastadas por certa distância até serem depositadas. Com isso, a principal forma de controle da erosão é deter o desprendimento das partículas do solo, ou seja, reduzir a velocidade de queda das gotas antes de atingirem o chão, por meio de técnicas de recobrimento do solo com palha ou folhas, ou mesmo com densas coberturas vegetais.

- Infiltração

A infiltração é definida por Wilken (1978) como o processo em que a água penetra nas camadas superficiais do solo, movendo-se para baixo, em direção aos lençóis de água subterrânea, em função da gravidade e das forças capilares. Durante a chuva, a infiltração começa com alta intensidade e reduz ao mínimo, até que, ao exceder a capacidade do terreno, a precipitação se torna escoamento superficial. Tal redução deve-se ao fato de que, no momento em que os espaços entre as partículas do solo ficam cheios de água, as forças capilares diminuem (MORGAN, 1995).

Além disso, a capacidade de infiltração depende de fatores como: espessura da camada saturada, umidade e textura do solo, macroestrutura do terreno, cobertura vegetal e compactação causada pela chuva e pelo homem. A variação na textura do solo exerce grande influência na velocidade de infiltração, visto que, em solos arenosos, por apresentar grandes espaços porosos, espera-se maior velocidade do que em solos argilosos. Porém, deve-se observar também todo o perfil do solo, pois, se abaixo do solo arenoso tem uma camada argilosa, a infiltração será rápida até que a primeira camada fique saturada, seguindo com menor velocidade (WILKEN, 1978).

- Escoamento superficial

O escoamento superficial ocorre quando tanto as capacidades de infiltração, quanto de armazenamento da água no solo são excedidas. Além disso, o fator cobertura vegetal também apresenta interferência, visto que sua ausência favorece o impacto da chuva, aumentando o fluxo do escoamento (NEVES, 2017). Apresenta caráter contínuo e gradativo, ou seja, as partículas vão sendo destacadas e transportadas encosta abaixo de forma progressiva.

Bertoni e Lombardi Neto (1985) afirmam que quanto mais longa a rampa da encosta, maior a energia de escoamento da superfície, aumentando o número de sulcos e perdas de solo. O aumento da energia deve-se tanto ao ganho de massa, visto que intensifica a quantidade de material desprendido; e à velocidade, alterada devido às mudanças na declividade do terreno.

Stabile (2013) expõe ainda outro fator do solo que influencia o escoamento, a resistência da superfície do solo, que se relaciona com a litologia, textura, estabilidade dos agregados, coesão e proteção pela cobertura vegetal. Assim, todos esses fatores alteram a capacidade do solo em ser erodido pela água da chuva.

A erosão causada pelo escoamento superficial pode ter origem de duas maneiras, influenciadas pela forma do escoamento. Quando a água da chuva não se concentra em canais definidos, origina a erosão laminar; porém, quando ocorre a formação de canais de água bem definidos, tem-se a erosão concentrada, ou linear (PEJON et al., 2013).

- *Piping*

A dinâmica da erosão não se limita apenas aos processos fluviais, mas também recebe influência do fluxo subsuperficial. Oliveira (2015) apresenta a definição do fenômeno *piping* como remoção do solo por meio da surgência da água subterrânea; processo que ocorre quando a força de coesão do solo é menor que a pressão da água.

De acordo com Almeida Filho e Gama Junior (2018), o fenômeno é uma erosão interna, capaz de provocar “tubos” vazios no interior do solo, com diâmetros que podem variar de poucos centímetros até vários metros. Com isso, o material acima desses dutos pode sofrer desabamentos, aumentando o tamanho da erosão; o que o torna o principal fenômeno de evolução das voçorocas.

2.2.2.2 Tipos de feições erosivas

Em diversas paisagens, com diferentes usos da terra e condições climáticas, observa-se a dinâmica de vários tipos de erosões, sendo elas efêmeras (*ephemeral gully*), permanentes ou clássicas (*permanent/classical gully*) e de margem (*bank gully*) (POESEN et al., 2003).

As erosões efêmeras indicam um acontecimento temporário, originado pela interação entre topografia, clima, características do solo e sua utilização (GUDINO-ELIZONDO et al., 2018a), podendo ser preenchido facilmente nas estações secas e novamente reformado na próxima estação chuvosa (CASALÍ et al., 2003).

Já as permanentes ou clássicas, são canais muito profundos que variam de 0,5 metro até 25-30 metros (POESEN et al., 2011). Quanto ao termo erosões de margem, é utilizado para aquelas formadas em locais em que o declive é muito íngreme (POESEN et al., 2003).

Outra classificação utilizada é separando-as entre erosão laminar (*sheet erosion*) e erosão linear (*gully erosion*). A erosão laminar resulta da remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais de solo, em extensas áreas, de modo quase imperceptível. Assim, a ação erosiva depende da distribuição pluviométrica e sua intensidade (ALMEIDA FILHO e GAMA JUNIOR, 2018).

Já as erosões lineares, de acordo com Poesen et al. (2003), são definidas como o processo de erosão em que a água de escoamento se acumula em canais estreitos, removendo o solo em grandes profundidades e em curto período de tempo. Sendo assim, são as principais responsáveis pela produção de sedimentos em ambientes naturais perturbados, visto que representam de 10 a 95% da massa total de sedimentos na escala de captação (ZOLEZZI et al., 2018). De acordo com a sua magnitude, recebem os nomes de sulcos, ravinas e voçorocas.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos tipos de feições erosivas.

Tabela 1 - Características das feições erosivas.

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 concentrado;	Não possui um tamanho definido, porém, é intermediário entre o sulco e a voçoroca;	São bem maiores em largura e profundidade em relação aos sulcos e ravinas;
O padrão de fluxo desenvolve pequenos canais paralelos e	Normalmente apresenta uma forma dendrítica padrão por	Apresenta um padrão dendrítico por cursos naturais de

desconectados que terminam em canais de fluxo concentrados;	onde a água tende a escoar. Esse fluxo é influenciado, geralmente, por feições provenientes de atividades agrícolas;	escoamento. Pode ocorrer também em divisões de canais e em diques de estradas;
Os cortes transversais dos sulcos, geralmente, são estreitos e pouco 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.

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

2.2.3 Suscetibilidade à erosão e fatores condicionantes

Como visto, o desenvolvimento das erosões está relacionado particularmente com a velocidade e volume do escoamento superficial necessários para transportar a massa do solo, além do tamanho e características da área de captação. Assim, o principal fator de carregamento dos sedimentos é a chuva em grandes quantidades.

De acordo com Neves (2017), no Brasil, além da ação da água da chuva, os processos erosivos surgem também devido aos solos com baixa coesão e textura arenosa e condições de relevo, como terrenos inclinados. No entanto, alguns processos ocorrem de maneira acelerada devido às intervenções antrópicas, em taxas superiores a erosão natural, ocasionando perdas ambientais, econômicas e sociais.

As cidades mais afetadas pelos processos erosivos são aquelas em rápido crescimento e desenvolvimento, com planejamento urbano limitado, causando, assim, fortes impactos sociais nas áreas circundantes. Aliado a isso, a maioria dessas realidades estão frequentemente localizadas em solos com características erodíveis (principalmente arenosos) e clima em que há predominância de tempestades nas estações chuvosas. Assim, tais processos mostram a evolução simultânea de um sistema social e geomórfico, devendo ser consideradas essas áreas potencialmente suscetíveis no planejamento, principalmente em escalas maiores que apenas a comunidade (ZOLEZZI et al., 2018).

Assim, Goldman et al. (1986) afirmam que os principais fatores condicionantes da erosão são: clima (chuva e temperatura); características do solo (textura, presença de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade); topografia e cobertura do solo (vegetação).

Tais fatores naturais podem ainda ser alterados pela ação do homem, modificando a dinâmica dos processos erosivos de uma determinada região; na maioria das vezes intensificando-os. Bocco (1991) ressalta como fatores propulsores uma inter-relação entre quantidade de escoamento, suscetibilidade/erodibilidade das partículas do solo e as modificações no uso e cobertura naturais do solo.

O comportamento do escoamento é diretamente influenciado pela declividade, comprimento da rampa e forma do relevo, o qual é representado pela combinação das classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e curvaturas verticais (côncava, retilínea ou convexa) (VALERIANO, 2008). De acordo com Goldman et al. (1986), as inclinações do relevo convexas ampliam o problema da formação de erosões, tendo em vista serem locais de máxima dispersão do escoamento; enquanto que as inclinações côncavas acumulam o escoamento. Já as áreas planas, principalmente na base da encosta, reduzem a erosão, além de permitir que os sedimentos das partes superiores da encosta se estabeleçam (Figura 2).

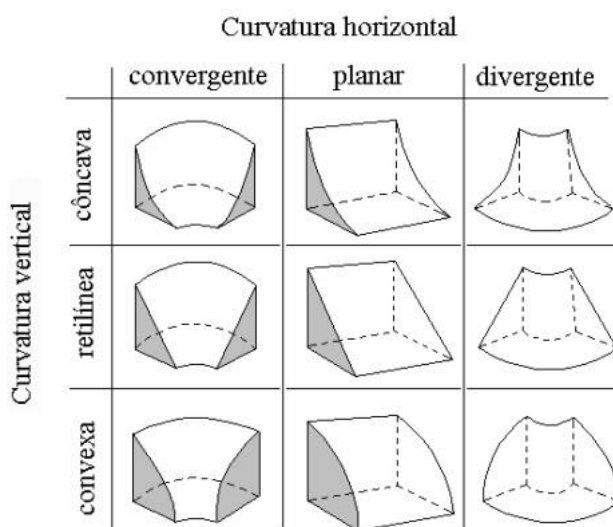


Figura 2 - Representação esquemática da combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.

Fonte: Valeriano (2008).

A fim de resumir os aspectos relacionados aos fatores condicionantes dos processos erosivos, Dantas-Ferreira (2004) elencou-os por meio de uma compilação de diversos autores, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Aspectos envolvidos nos processos erosivos.

Fatores	Características
Chuva	<ul style="list-style-type: none"> - Um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos; - O volume e velocidade da enxurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva; <ul style="list-style-type: none"> - A intensidade é o fator pluviométrico mais importante na erosão; - Em regiões tropicais, o efeito de degradação pelo clima está aliado a precipitação e sua capacidade de causar erosão; - São considerados dois agentes erosivos distintos: a gota de chuva e o escoamento superficial; - A evolução do processo erosivo está ligada à quantidade de água excedente que escoar na encosta; - Os processos erosivos são mais atuantes e energéticos nos períodos mais chuvosos e, por isso, é importante estabelecer os índices pluviométricos para os meses durante o ano; - 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.
Topografia	<ul style="list-style-type: none"> - Agentes geomorfológicos desencadeadores na formação de voçorocas devem ser considerados, em escala maior: as características típicas das encostas e suas feições particulares (associadas a litologia local) e em escala menor: processos de modelado cujos últimos eventos refletem a cobertura vegetal; <ul style="list-style-type: none"> - A influência da topografia do terreno na intensidade erosiva manifesta-se principalmente pela declividade e comprimento de rampa (comprimento da encosta); - Se a declividade aumenta quatro vezes, a velocidade de escoamento aumenta duas vezes e a capacidade erosiva quadruplica.
Natureza do Solo	<ul style="list-style-type: none"> - 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 perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica; - As propriedades do solo que afetam a erosão são: textura, estrutura, densidade aparente dos solos, 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.
Cobertura Vegetal	<ul style="list-style-type: none"> - A vegetação desempenha um papel importante, pois promove uma distribuição mais difusa da água de escoamento pluvial, dificultando a instalação da erosão; - Em terrenos descobertos, a enxurrada faz desprender e salpicar as partículas de solo, que são 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 de água.
Ação Antrópica	<ul style="list-style-type: none"> - É o principal fator na deflagração dos processos erosivos; <ul style="list-style-type: none"> - A intervenção humana no meio, com o desmatamento, seguido ou não de exploração econômica, implantação de obras civis e/ou núcleos urbanos, altera sua estabilidade; - A readaptação a nova condição se manifesta na força de intensificação dos processos erosivos; - A modificação das encostas provoca 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 Limiares topográficos

2.3.1 Definição e parâmetros

O processo da erosão se desenvolve quando algum limiar é excedido, seja ele fluxo hidráulico, precipitação, relevo, solo e uso da terra. Sendo assim, tem-se discutido diversas formas de identificar esses limiares críticos de iniciação e desenvolvimento de tais processos. Poesen et al. (2003) ressaltam que a maioria dos modelos de erosão do solo não examinam a localização inicial das erosões, questão importante para os gestores estudarem os possíveis impactos que podem ser causados com a modificação do uso do solo, na distribuição espacial.

Em relação ao fluxo hidráulico, os canais são formados quando, em um evento de chuva, a intensidade do fluxo concentrado excede um valor limite. Em 1945, Horton propôs pela primeira vez um conceito de força limite necessária para a iniciação do canal, denominada de tensão crítica de cisalhamento de fluxo concentrado. Os valores críticos de tensão podem ser afetados com as práticas de manejo da terra, como foi visto no aumento do valor em áreas de solo compactado (POESEN et al., 2003).

Quanto aos limiares de precipitação, diversos fatores interferem, como latitude, altitude, clima e vegetação. Poesen et al. (2003) apresentam dados de um estudo realizado na Bélgica, que, durante 15 anos, foram estudados 38 eventos de erosão, em que os valores críticos de precipitação foram maiores no verão do que no inverno. A diferença foi atribuída ao fato de o teor de umidade do solo ser divergente entre as estações. Além disso, locais com mudanças climáticas instáveis, ou seja, com congelamentos e descongelamentos de neve repentinos e chuvas intensas, apresentam-se como casos especiais, já que o desenvolvimento de erosões é alto mesmo em locais de declive suave.

Além destes fatores, existe uma condição morfométrica, dada em função da relação entre área de contribuição e declividade que influencia o desencadeamento das erosões. Patton e Schumm (1975) foram os primeiros autores na literatura a estabelecerem uma correlação entre o surgimento das erosões e características morfométricas, denominado de limiar topográfico (*topographic threshold*).

As condições como a morfometria, características do solo, cobertura vegetal e uso da terra interferem significativamente no desencadeamento dos processos erosivos, porém, as fortes chuvas tendem a ser os propulsores das erosões (ROSSI et al., 2015). A erosão tende a se formar quando uma interação entre esses atributos excede a tensão crítica de cisalhamento do solo (GUDINO-ELIZONDO et al., 2018a). Assim, o fator mais importante no limiar topográfico é a velocidade do escoamento superficial e sua

concentração em um local, seja por fatores naturais ou humanos (ARAÚJO e PEJON, 2015).

Além disso, a cobertura do solo apresenta-se como outro fator a ser considerado, visto que quando a cobertura vegetal é degradada, o solo se torna mais sensível aos processos erosivos. Um estudo realizado na Europa apresentou limiares topográficos divergentes para cada ambiente, e, como explicação mostrou que o tipo de vegetação foi mais importante do que as condições climáticas (POESEN et al., 2003).

Existem diversos métodos computacionais para prever tais ocorrências, que, segundo Svoray et al. (2012), utilizam duas abordagens diferentes: sistemas baseados em conhecimento especializado ou em métodos empíricos. Alguns desses métodos observaram a existência de uma relação inversa entre a área de contribuição da bacia hidrográfica e a inclinação do local. De acordo com a abordagem, o volume de escoamento aumenta proporcionalmente à área de captação, podendo ocorrer erosões em locais que o limiar topográfico foi excedido (SVORAY e MARKOVITCH, 2009).

Segundo Gómez-Gutiérrez et al. (2015), a topografia é um fator chave para o início e desenvolvimento de erosões, porque determina o poder erosivo do fluxo hídrico. Ou seja, a área de drenagem de cada local na paisagem é controlada diretamente por alterações que existem na topografia, enquanto o gradiente de declive local controla a velocidade do fluxo.

A partir desta constatação Begim e Schumm (1979) e Montgomery e Dietrich (1994) propuseram as primeiras equações para representar o limiar crítico de desencadeamento das erosões. No âmbito da geomorfologia, tal abordagem se baseia na hipótese de que, em uma paisagem, existe para certa inclinação do solo (S), uma área de drenagem (A) necessária para produzir um escoamento que causará o início da erosão. A equação que expressa a teoria é apresentada a seguir:

$$S = aA^{-b}$$

em que: S é a declividade do local; A é a área de contribuição da cabeceira; a e b são coeficientes empíricos do limiar topográfico, que indicam a posição e inclinação da reta respectivamente, e dependem das condições ambientais e do método de coleta dos dados (SVORAY e MARKOVITCH, 2009).

De acordo com Gómez-Gutiérrez et al. (2009), a é uma constante que varia com a litologia, solo, clima e cobertura vegetal, enquanto b é um expoente relacionado com o

processo dominante durante a formação e desenvolvimento do canal. Sendo assim, com o aumento da inclinação, a área crítica de drenagem diminui e vice-versa, tendo em vista que os limites se aplicam diferentemente de acordo com as características ambientais.

A relação é plotada em um gráfico logarítmico, em que uma linha é traçada no limite inferior de dispersão dos pontos, indicando, para uma certa área de contribuição, um valor crítico para a declividade da encosta cuja erosão é capaz de iniciar (GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2009). Destaca-se ainda que o posicionamento da reta varia conforme os mecanismos de fluxo, seja superficial (*overflow*): reta descendente; ou subsuperficial (*inflow*): reta ascendente (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

Na Figura 3 é apresentado o primeiro gráfico desenvolvido por Patton e Schumm (1975), utilizando a metodologia para erosões lineares e laminares no noroeste do Colorado.

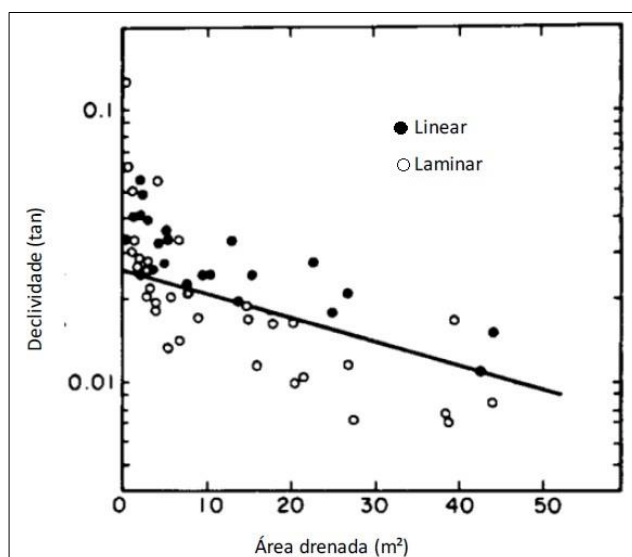


Figura 3 - Gráfico SxA para erosões lineares e laminares no Colorado.

Fonte: Adaptado de Patton e Schumm (1975).

A Figura 4 mostra uma representação da área de contribuição (A), localizada logo acima da cabeceira da erosão, e da declividade (S) contribuindo para a formação do processo erosivo. Cabe ressaltar que a declividade da superfície do solo pode ser medida de diferentes maneiras. Por exemplo, Patton e Schumm (1975), além de Montgomery e Dietrich (1988), adotaram o valor de declive mais íngreme da superfície ao longo da encosta (S1). Vandaele et al. (1996) usaram o gradiente de declividade da superfície do

solo logo acima da cabeceira da erosão (S2). Já Araújo (2011) e Neves (2017) consideraram o valor de S como sendo a média da área de contribuição.

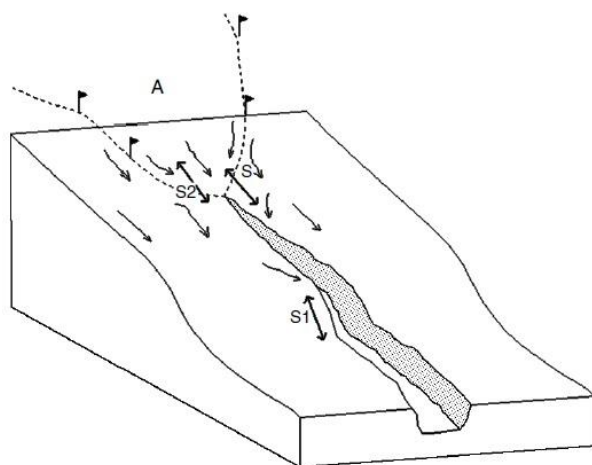


Figura 4 - Representação esquemática da contribuição de A e S para a formação do processo erosivo.

Fonte: Nyseen et al. (2002).

Esta metodologia foi desenvolvida por Patton e Schumm (1975) e reformulada por outros pesquisadores. Em síntese de pesquisas que utilizaram a abordagem, encontram-se os autores: Patton e Schumm (1975), Montgomery e Dietrich (1988), Dietrich et al. (1993), Vandaele et al. (1996), Oostwoud Wijdenes et al. (1999), Vandekerckhove et al. (2000), Nachtergaele et al. (2001), Vieira (2002), Coelho Netto (2003), Morgan e Mngomezulu (2003), Vanwalleguem et al. (2005), Menendez-Duarte et al. (2007), Knapen e Poesen (2010), Verachtert et al. (2010), Araújo (2011), Jefferson e McGee (2013), Katz et al. (2013), Stabile (2013), Maignard et al. (2014a), Ghosh e Guchhait (2016), Neves (2017) e Gudino-Ellizondo et al. (2018b).

Os métodos aplicados para a obtenção dos parâmetros S e A, nesses casos, foram diversificados, contendo levantamento de campo, fotografia aérea, MDE, mapa topográfico e processamento automático em SIG (NEVES, 2017).

Já em relação aos estudos realizados no Brasil, são numerosos os que abordam os processos de erosão. Porém, tratando-se de estudos específicos sobre limiar topográfico utilizando a metodologia citada, podem-se citar: Araújo (2011), aplicado em São Pedro – SP; Stabile (2013), aplicado em Piratininga – SP; e Neves (2017), também no município de São Pedro – SP.

Em diversos países o limiar topográfico foi aplicado com o objetivo de prever as áreas de ocorrência de erosão. A partir do levantamento realizado por Torri e Poesen (2014) é possível notar 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 (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores dos parâmetros (a e $-b$) obtidos nos últimos anos.

Autores	Local	A	-b
Patton e Schumm (1975)	EUA	0,16	0,26
Montgomery e Dietrich (1988)	EUA	0,25	0,4
Montgomery e Dietrich (1994)	EUA (Nevada)	0,09	0,50
Montgomery e Dietrich (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
Vandekerckhove et al. (1998)	Espanha	0,157	0,133
Vandekerckhove 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 (2013)	Brasil	0,064	0,084
Neves (2017)	Brasil	0,06	0,28

Fonte: Adaptado de Torri e Poesen (2014); Neves (2017).

A fim de corroborar tais diferenças, Vandaele et al. (1996) apresentaram em gráfico os resultados das equações obtidas de diversos trabalhos (Figura 5). Além dos valores de a e b , expressos pelas condições locais, as divergências também foram observadas quanto à forma de obtenção das variáveis A e S (em campo ou por meio de fotos aéreas) e quanto ao tipo de erosão (sulcos, ravinas e voçorocas).

Ressalta-se o caso da Bélgica, que, ao realizar dois estudos com voçorocas, mas com diferentes métodos de obtenção, os valores de A foram próximos, enquanto os de S apresentaram variação. Já o terceiro estudo, que tratou de erosões do tipo sulco, apresentou valores de A muito menores, ficando S próximos dos outros dois. Além disso, pode-se observar que a inclinação da reta dos três casos foi bastante semelhante (valores de b semelhantes).

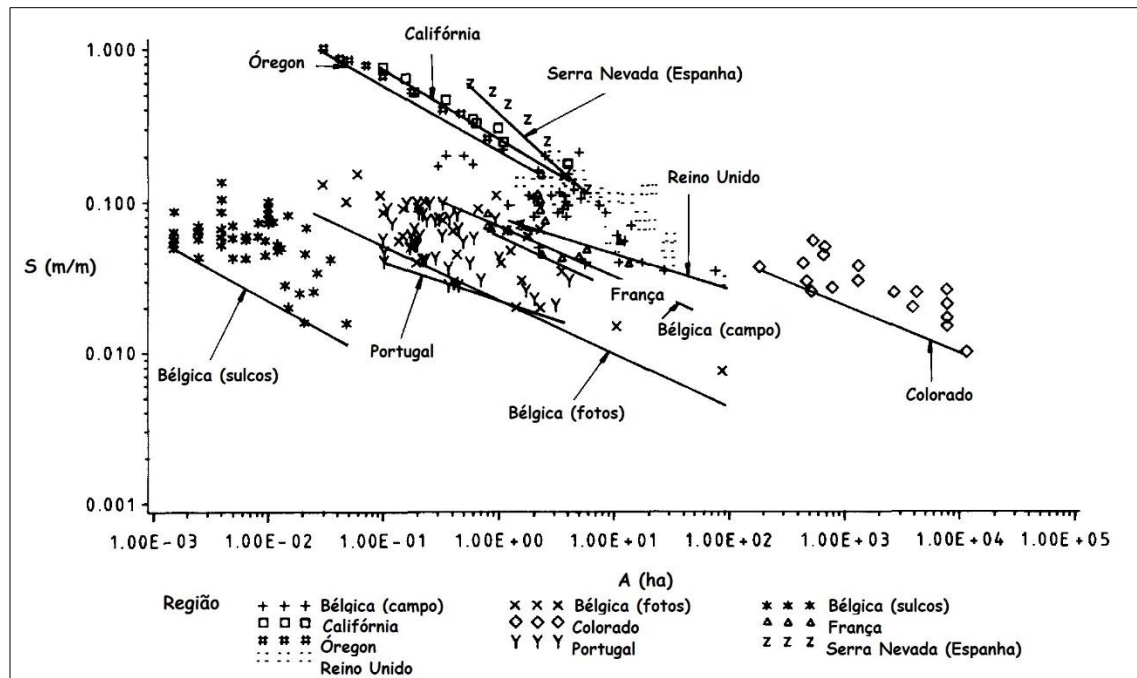


Figura 5 - Gráfico SxA para diferentes conjuntos de dados.

Califórnia (Montgomery e Dietrich, 1988); Óregon (Montgomery e Dietrich, 1988); Serra Nevada (Montgomery e Dietrich, 1988); Bélgica - sulcos (Govers, 1991); Colorado (Patton e Schumm, 1975); Bélgica - campo (Poesen et al., 1995); Bélgica - foto (Vandaele et al., 1995); Reino Unido (Boardman, 1992); França (I.G.N., 1983); Portugal (Vandaele et al., 1995).

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

2.3.2 Métodos de obtenção dos parâmetros

Diferentes métodos foram utilizados para obter os parâmetros área de contribuição e declividade ao longo dos anos, desde métodos mais antigos e tradicionais, até tecnologias avançadas. A Tabela 4 apresenta um levantamento e a relação dos principais métodos utilizados.

Tabela 4 - Métodos de obtenção dos limiares topográficos desenvolvidos nos últimos anos.

Autores	Área de estudo	Declividade	Área de drenagem
Patton e Schumm (1975)	Colorado	Mapa topográfico	Mapa topográfico
Vandaele et al. (1995)	Portugal	Mapa topográfico	SIG
Vandekerckhove et al. (1998)	Portugal	Mensuração em campo	Mensuração em campo
Vanwalleghem et al. (2005)	Bélgica	Mensuração em campo	Mensuração em campo
Knapen e Poesen (2010)	Bélgica	<i>Clinometer</i>	GPS
Jefferson e McGee (2013)	Carolina do Norte	MDE	SIG (D-Infinity)
Stabile (2013)	Brasil	MDT (10m)	SIG
Katz et al. (2013)	Colorado	MDE (5m)	SIG
Maugnard et al. (2014a)	Bélgica	MDE (10 m)	SIG (D8)
Araújo e Pejon (2015)	Brasil	MDE (2 m)	SIG (D8)
Ghosh e Guchhait (2016)	Índia	<i>Sprinter 150</i>	SIG

Neves (2017)	Brasil	MDE (5 m)	SIG (D- <i>Infinity</i>)
Gudino-Ellizondo et al. (2018b)	México	DSM (0.3 m)	SIG

(*) DSM: *highly accurate digital surface models*.

Para determinar se, de fato, o relevo atinge uma inclinação crítica antes que a incisão de voçorocas ocorra, os pioneiros Patton e Schumm (1975) mapearam os parâmetros dos processos erosivos em cartas topográficas do noroeste do Colorado. A declividade foi medida entre duas curvas mais próximas da erosão e, em seguida, a área da bacia de contribuição acima da cabeceira foi medida para todos os pontos.

Quanto a mensuração em campo, Vandekerckhove et al. (1998) levantaram 50 eventos de erosão no sul da Espanha e norte de Portugal. O declive foi medido com um nível de Abney, em uma distância de 2 a 4m; e a área de contribuição, medida com uma fita métrica, nos locais em que se assumiu que o escoamento superficial atingiu a seção transversal do canal crítico. Tal delineamento foi baseado em evidências da topografia local e de características microtopográficas, como marcas de preparo do solo e traços de caminhos de escoamento. Com isso, afirmam que tal medição é mais realista do que o delineamento a partir de mapas topográficos, que não incluem variações locais de inclinação.

Já no estudo de Katz et al. (2013), os autores buscaram identificar o limiar necessário para a origem das erosões provocadas pela pavimentação da rodovia Pikes Peak, localizada entre Cascade, Colorado e o cume do Pikes Peak. Os canais foram mapeados por meio de trenas e GPS em uma série de segmentos, nos limites inferior e superior de cada voçoroca. A declividade foi calculada a partir da diferença de elevação entre tais limites dividida pelo comprimento total da erosão, com base no MDE; e a área de contribuição por meio da ferramenta *Hydrology* do ArcGIS. No final, métodos estatísticos foram atribuídos, como de Shapiro-Wilk, para testar a normalidade.

Para os estudos realizados no Brasil, Stabile (2013) analisou os limiares críticos de erosões localizadas em Piratininga (SP). A mensuração da declividade (S) foi realizada de duas maneiras: em campo utilizando um pantômetro, e com o Modelo Digital do Terreno (MDT), no qual foram obtidas também as áreas de contribuição para cada uma das feições. Em relação à obtenção da declividade, o autor concluiu que o método utilizado reflete significativamente nos valores deste parâmetro, adotando os limiares calculados do MDT. A declividade foi calculada com a ferramenta *Slope*, no *software*

ArcMap; e a área de contribuição, por meio do modelo matemático *SHALSTAB*, no *software* ArcView GIS.

O trabalho de Araújo e Pejon (2015) aplicado na região de São Pedro (SP) envolveu a proposição de um limiar topográfico para canais rasos (<1m) e profundos (>1 m), na qual as características foram obtidas por fotografias aéreas ortorretificadas. A declividade e áreas de contribuição também foram geradas de forma automática no *software* ArcGIS.

O outro trabalho desenvolvido no Brasil foi realizado por Neves (2017), também na região de São Pedro (SP). Com relação à obtenção dos parâmetros topográficos, destaca-se a utilização e comparação de diferentes algoritmos de fluxo: D8 e *D-Infinity*. A autora verificou que o *D-Infinity* favoreceu a obtenção de áreas de contribuição com melhor conformidade morfométrica, além disso, permitiu o ajuste matemático com a função potência, assim como já realizado em outros trabalhos.

Observa-se que os limiares erosivos costumam ser definidos por meio de observações de campo, interpretações fotográficas e principalmente com auxílio do MDE. Para Castillo et al. (2014), a grande tendência é a busca por abordagens semi ou totalmente automatizadas na análise do terreno, com dados de alta resolução espacial (de 0,5 a 2m), visto que se apresentam mais vantajosas quando comparadas com métodos manuais.

Ademais, o autor citado também afirma que a identificação por imagens aéreas tem sido muito utilizada pela facilidade de discriminação da paisagem, em virtude de suas diversas cores, texturas e sombras. Permitem, portanto, a visualização de locais em que o acesso é impedido, como deslizamentos de terras, inundações e colapsos; e tornam o processo mais rápido e com maiores amplitudes que os levantamentos manuais (CASTILLO et al., 2014).

2.3.2.1 Fatores que influenciam na obtenção dos parâmetros

Um dos fatores de influência no método do limiar topográfico é a intervenção humana, capaz de alterar as formas do relevo. Por exemplo, as áreas reais de drenagem acima das cabeceiras de erosões, podem ser significativamente diferentes daquelas derivadas de um mapa topográfico ou de um MDE. Essa discrepância é causada por modificações importantes do padrão de escoamento após as intervenções, tais como a criação de estradas, trilhas, sulcos oriundos da lavoura e outros (NYSSSEN et al., 2002).

Além disso, o método do limiar topográfico é considerado empírico, visto que é baseado em experiências e observações (muitas vezes tendo medições de campo), o que diferencia de abordagens especializadas, que se baseiam em conhecimento processado apenas em mineração de dados. O segundo método também apresenta desvantagens, como a possibilidade de a programação realizada em computador não ser compreendida corretamente. Assim, observa-se a necessidade da conciliação de ambos os métodos, utilizando técnicas computacionais aliadas à validação em campo.

Nesse contexto, diversos autores discutem vantagens e desvantagens do método do limiar topográfico, direcionando-as principalmente ao fator resolução espacial, o qual influencia diretamente na obtenção dos parâmetros.

- Resolução Espacial x Superestimação e Subestimação

Nas últimas pesquisas, a obtenção das variáveis morfométricas se deu através dos MDE, que por sua vez, devem ser elaborados de maneira consistente, contemplando curvas de nível e hidrologia. A acurácia dos modelos está diretamente relacionada aos parâmetros de entrada, que devem estar em escala compatível com o *pixel* de saída, e digitalizados adequadamente, favorecendo a interpolação e representação das variações topográficas (NEVES, 2017).

Segundo Gudino-Elizondo et al. (2018b), embora os MDE sejam muito utilizados para a delimitação das bacias hidrográficas e dos parâmetros existentes, alguns podem apresentar resolução espacial insuficiente para a representação do fluxo hídrico, principalmente em ambientes de rápida alteração. Assim, observa-se a resolução como fator importante na precisão e conseqüentemente na quantidade de dados extraídos a serem analisados (CASTILLO et al., 2014).

A fim de prever os locais sujeitos a erosão, Daggupati et al. (2013) aplicaram um modelo geoespacial automatizado em SIG, considerando variáveis obtidas a partir do MDE, tais como declividade, área de drenagem e plano de curvatura da encosta. Além disso, também foi considerado o uso do solo e estradas. Ao verificar a interferência da resolução espacial na previsão da erosão, foi possível notar que à medida que a resolução aumenta (2-30m), possíveis áreas de ocorrência de erosão deixam de existir. Portanto, MDE com resoluções mais finas são mais indicados para prever os locais de ocorrência de erosão.

É importante destacar que, segundo Gómez-Gutiérrez et al. (2015), existe uma relação entre tamanho do *pixel* e desempenho do modelo, que por sua vez está

relacionado com o relevo a ser modelado. Os autores utilizaram dois modelos preditivos multivariados (MARS e CART) para analisar os processos erosivos na bacia de San Giorgio (Itália) e na bacia do rio Mula (Espanha) usando apenas atributos topográficos como variáveis independentes. O resultado para a bacia de San Giorgio, cujas erosões são pequenas (<5m²), MDE com resoluções de 4m foram mais indicados. Já para as feições da bacia de Mula, melhores resultados foram obtidos com MDE de resoluções entre 10 e 20m.

Millares et al. (2012) avaliou a influência de três modelos digitais de elevação com resoluções diferentes (5, 10 e 30m) na previsão de processos erosivos. Também foi levada em consideração a distribuição espacial das propriedades físicas do solo e eventos de precipitação. A área de estudo compreendeu uma bacia hidrográfica localizada no sudeste da Península Ibérica. No geral, os resultados indicam uma clara variação nos valores de área de contribuição e observa-se este efeito principalmente para os pontos localizados em encostas, e locais sujeitos a processos difusos.

Uma importante constatação foi a superestimação das áreas críticas para o MDE (30m), devido à dificuldade de identificar o processo de incisão, o que se deve provavelmente à ausência de características do relevo; além da subestimação dos dados obtidos a partir do MDE (5m), que ao ser utilizado no modelo hidrológico para avaliar as relações infiltração-escoamento superficial e sua influência na seleção de áreas críticas, apresentou uma rede de drenagem extremamente densa, produzindo maior variabilidade dos valores prováveis de tensão de cisalhamento do que os estimados em campo.

Além disso, a alta resolução também levou à incompatibilidade entre a localização da cabeceira da erosão medida no campo e a obtida pelo algoritmo de fluxo, concluindo que as diferentes propriedades físicas do solo, resoluções dos MDEs e algoritmos de fluxo utilizados podem interferir diretamente nos resultados. Sendo assim, para as condições hidrológicas e geomorfológicas analisadas, o MDE (10m) foi o que apresentou melhores resultados para determinar as áreas com potencial de ocorrência de erosão (MILLARES et al., 2012).

A resolução do MDE interfere também na precisão das variáveis consideradas, como por exemplo, pode subestimar a inclinação, especialmente em áreas com grandes mudanças de elevação. Entre todas as variáveis utilizadas nos modelos de previsão, a área de contribuição é a mais sensível aos erros (DEWITTE et al., 2015), pois é dependente do tamanho do *pixel* - os valores de fluxo acumulado são calculados em cada um deles –

sendo, portanto, a escala fundamental para não ocorrer perdas de informações (NEVES, 2017).

Assim, Neves (2017) apontou que, para sua área de trabalho (município de São Pedro – SP), quanto maior a resolução (no caso 2x2m), melhor o resultado de aquisição dos parâmetros A e S, permitindo a determinação de áreas de contribuição mais realistas e condizentes com as características da área. A Figura 6 apresenta uma comparação das áreas de contribuição calculadas pela autora a partir do MDE em três resoluções: 2x2m, 10x10m e 30x30m.

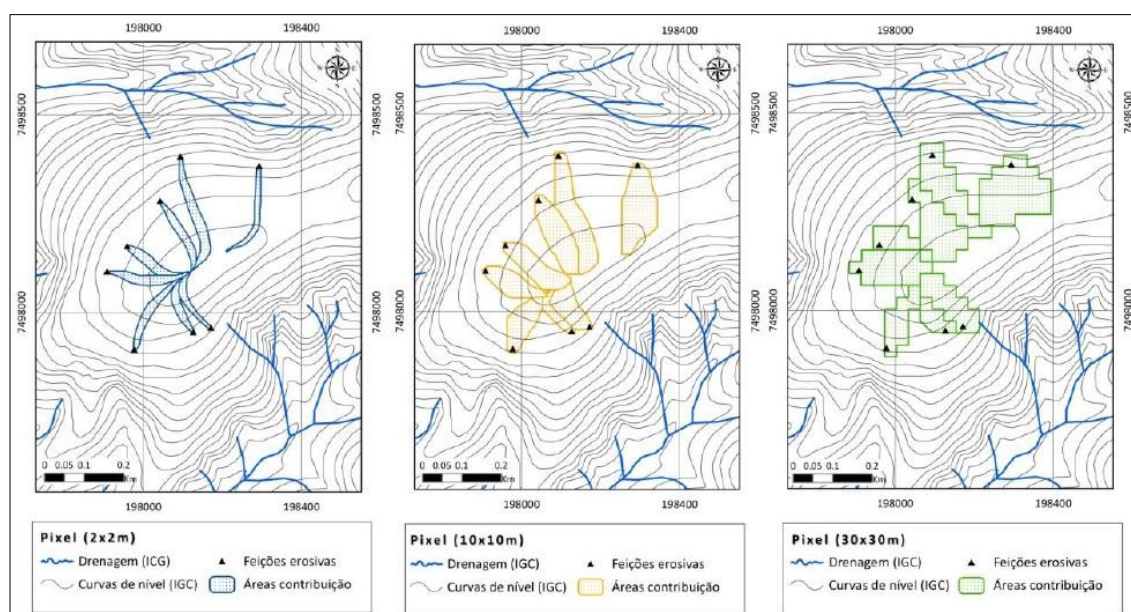


Figura 6 - Influência da resolução (tamanho do *pixel*) nas áreas de contribuição.

Fonte: Neves (2017).

Ainda para comprovar a importância da resolução, em pesquisa realizada na Bélgica, Maignard et al. (2014a) classificaram as feições erosivas, vistas na escala 1:2500 em fotografias aéreas, em três classes: localizadas em um eixo de concentração de escoamento bem definido; em encostas sem um eixo de escoamento aparente; e aquelas causados por fatores antropogênicos. Os tipos 1 e 2 são formações naturais, cuja distinção é fortemente dependente da resolução do MDE e, portanto, parcial. Assim, teve a necessidade de inutilizar as do tipo 2, pois a área de contribuição não poderia ser determinada com precisão usando o MDE disponível (10x10m).

Em contrapartida, como citado, Gómez-Gutiérrez et al. (2015) apontaram que a melhor resolução é determinada pela forma do relevo, ou seja, o aumento da resolução do

MDE pode significar uma descrição mais precisa da superfície; porém não significa parâmetros topográficos mais precisos. A precisão dos atributos deve ser avaliada em relação à escala natural do relevo específico. Com isso, afirmam que o tamanho ideal do *pixel* depende da área de estudo, do conjunto de dados e do objetivo.

2.3.3 Aplicação em outros estudos

Em âmbito internacional, as pesquisas desenvolvidas nos últimos anos sobre processos erosivos (lineares) concentraram-se principalmente na aplicação do método do limiar topográfico, sendo uma das avaliações mais “populares” (CASTILLO; GÓMEZ, 2016). A vasta aplicação provavelmente deve-se à sua natureza simplificada, pois, considera apenas duas variáveis (área de contribuição e declividade média), que por sua vez, podem ser facilmente obtidas através de técnicas de geoprocessamento. Além do mais, os resultados podem auxiliar na compreensão da dinâmica do desencadeamento das erosões lineares (NEVES, 2017).

Apesar de ser um método simples de predição, algumas limitações foram encontradas em diversas pesquisas (Svoray et al., 2012) e, portanto, as adaptações e melhorias devem ser consideradas. Para Castillo e Gómez (2016) as pesquisas futuras devem ser desenvolvidas com auxílio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, otimizando a aquisição de dados, mas também devem analisar os processos subjacentes à dinâmica da erosão. Ou seja, devem ser realizados trabalhos de campo para avaliar a permeabilidade ou instabilidade ao longo do perfil, abrangendo a execução de ensaios geotécnicos e hidrogeológicos.

Nos trabalhos recentes é possível notar a inclusão de outros parâmetros. Para Daggupati et al. (2014) os aspectos morfométricos fundamentais que controlam a ocorrência das erosões são: área de drenagem; declividade e plano de curvatura. Os autores destacam além destes, que o desencadeamento das erosões, por exemplo ravinas, depende também da resistência do solo, caracterizada pela tensão de cisalhamento crítica, que por sua vez está relacionada com a umidade do solo, densidade, granulometria, erosividade, *sealing* e *crusting*.

Em estudo no Brasil, Neves (2017) também constatou a influência de outras variáveis no desencadeamento da erosão, como geologia e relevo, isto porque para alguns pontos os valores de declividade foram relativamente baixos (6,04%). Outros dois índices foram obtidos neste trabalho, conforme a posição dos canais no relevo. Para os canais localizados em drenagem, os valores de declividade crítica foram 7,48%, e para canais

em encosta, 5,39%, considerando uma área de contribuição de 1 ha. Com isso, nota-se a influência do relevo nos mecanismos de escoamento superficial e incisão das feições erosivas.

Imwangana et al. (2014) apresentou a utilização de outro fator, além dos parâmetros SxA, em virtude de a rede viária construída na cidade de Kinshasa, Congo, ser a principal causadora da sedimentação e concentração axial da água. A equação desenvolvida para o controle rodoviário foi: $S = cLc^{-d}$, em que Lc é o comprimento de estradas localizadas acima da cabeceira da erosão e ‘c’ e ‘d’, fatores ambientais.

Considerando a proposta de análise integrada, envolvendo variáveis morfométricas e hidrológicas, Daggupati et al. (2014) desenvolveram um modelo de previsão de erosão baseado no “*overland flow*”. O OFT Model prevê as áreas críticas de erosões decorrentes de diferentes mecanismos de fluxos: *overland flow*; *seepage* ou *landsliding*. O OFT considera ainda condições de cobertura do solo, clima, hidrologia, e propriedades do solo, que necessita essencialmente de informações de campo detalhada e um modelo hidrológico adequado. Para validar o modelo obtido adotou-se como referência o limiar topográfico (SxA).

O modelo de predição associado a condições hidrológicas favorece a melhor previsão de áreas críticas, pois leva em consideração as características das precipitações. Apesar da eficiência esperada, é interessante notar que ao comparar o OFT com o SxA, os autores concluíram que parâmetros topográficos podem ser utilizados como alternativa de modelos mais robustos, que demandam um processo de calibração mais demorado e levantamento de campo.

Em relação aos modelos robustos, Daggupati et al. (2013) destacam ainda que o EGEM, CREAMS, WEPP, AGNPS não conseguem prever a localização das feições erosivas. Neste contexto, destaca-se mais uma vez a importância do limiar topográfico na previsão da erosão. Para os autores, além da área de drenagem e declividade, o plano de curvatura da encosta também deve ser considerado como uma das variáveis topográficas nos modelos de previsão. Os autores destacam que, além destes, o desencadeamento das erosões também depende da resistência do solo, caracterizada pela tensão de cisalhamento crítica.

A fim de solucionar a indisponibilidade de dados em escala de detalhe no Norte da Argélia, Dewitte et al. (2015) compararam o limiar topográfico com um modelo baseado em análise de regressão logística (LR). A partir de mapas topográficos (1:50.000) e dados matriciais (20m) foram obtidas as variáveis independentes: elevação,

declividade, aspecto, curvatura da encosta e área de contribuição. Também foram calculados os seguintes índices: índice de transporte de sedimento (CTI); índice de fluxo (SPI) e índice topográfico (TWI). Ressalta-se, assim, a possibilidade de previsão de variáveis por meio de métodos estatísticos, o que configura uma solução para estudos desenvolvidos em regiões/países com ausência de dados.

Nesse mesmo contexto, Gómez-Gutiérrez et al. (2015) aplicaram modelos espaciais multivariados (MARS) considerando apenas variáveis topográficas para prever as áreas de ocorrência de erosão em duas bacias hidrográficas localizadas no Sudoeste da Espanha. Para isto, foram utilizadas variáveis topográficas primárias: inclinação, aspecto, plano de curvatura e área de contribuição (*D-Infinity*), e secundárias: índice de umidade topográfica – TWI e índice de potência de fluxo – SPI. Os dados foram obtidos a partir de DEMs de diversas resoluções (2, 4, 10, 20 e 50m) produzidos a partir de missões *LIDAR*. A pesquisa demonstra que a predição de processos erosivos pode ser realizada a partir de um conjunto “pequeno” de variáveis topográficas, obtidas a partir do DEM.

Além de métodos estatísticos, outros métodos têm sido empregados. Para prever as áreas de ocorrência de erosão em uma bacia hidrográfica localizada em Israel, Svoray et al. (2012) compararam três técnicas diferentes: data mining (DM); análise hierárquica (AHP) e limiar topográfico (TT). De maneira geral, data mining pode ser definida como uma técnica de inferência de algoritmos a partir de modelos matemáticos. No desenvolvimento do trabalho os autores utilizaram variáveis ambientais, climáticas e antrópicas, como dados morfométricos, vegetação, solo, pluviosidade, estradas e uso do solo.

O DM quando comparado com a AHP revelou uma melhor habilidade preditiva de erosão, o que se deve à técnica aplicada de treinamento de dados, que se difere da abordagem mecanicista teórica. Quanto à comparação com o TT, os resultados são muito semelhantes, o que se justifica devido à natureza binária do limiar (A e S). Algumas exceções foram observadas, como pontos acima do limiar que não cumprem as condições necessárias, induzindo conseqüentemente a uma superestimação. No entanto, deve-se considerar que o desencadeamento destas erosões pode estar relacionado com outras variáveis (SVORAY et al., 2012).

2.4 Geoprocessamento

De acordo com Lobato et al (2008), o uso do geoprocessamento surgiu com o início da manipulação de dados espaciais georreferenciados em sistemas

computadorizados, por meio de ferramentas denominadas Sistemas de Informações Geográficas - SIG.

Os SIGs podem ser definidos como sistemas capazes de introduzir, armazenar, transformar e exibir dados espaciais que foram previamente digitalizados e registrados em um dado sistema de coordenadas. Além disso, trata-se de um exemplo de Sistema de Informação (SI), ou seja, um conjunto de dados disponíveis, que permite dar respostas a determinadas questões, no contexto em que esse sistema foi originado. Assim, os SIGs recolhem os dados espaciais, ordenando-os e recriando-os a fim de se encontrar a informação correta e responder às questões levantadas.

2.4.1 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Um SIG pode também ser definido como um sistema com quatro grupos de aptidões (entrada, gerenciamento, manipulação e análise, e saída), cujo objetivo é manusear dados georreferenciados. Consideram-se georreferenciados os dados quando possuem duas características: dimensão física e localização espacial.

As principais características dos SIGs podem ser resumidas como: integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de diversas fontes, como dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; combinar as informações para gerar mapeamentos derivados; consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados (PEREIRA et al, 2009).

Tais sistemas originaram-se nos anos 60, no Canadá, com o objetivo de criar um inventário de recursos naturais. Porém, os sistemas não apresentaram muito êxito em virtude de fatores como falta de mão de obra especializada, de capital financeiro e infraestrutura suficiente. Nos anos 70, novos sistemas computacionais foram desenvolvidos, além de elementos matemáticos voltados para a cartografia, como a geometria computacional. Porém, ainda devido aos custos e equipamentos, a tecnologia só era acessível às grandes organizações.

Já na década de 80, os SIGs apresentaram um acelerado crescimento, graças aos avanços da microinformática (popularização das estações de trabalho gráficas e surgimento de computadores pessoais) e da consolidação de grupos de estudos no assunto, estabelecendo o Geoprocessamento como disciplina científica independente. Atualmente, os programas estão muito inseridos nas organizações, principalmente pela

facilidade de construção e manipulação de base de dados e pela redução dos custos de *hardware* e *software* (CÂMARA et al., 2001).

No Brasil, os SIG também tiveram início nos anos 80, com a vinda do responsável pela criação do primeiro sistema no Canadá. Assim, um grupo da UFRJ foi o pioneiro no desenvolvimento de um sistema de análise geográfica. Ainda segundo Câmara et al., (2001), os objetivos de seu surgimento foram aperfeiçoar soluções e reconsiderar o uso de recursos, como é utilizado nos casos de planejamento e ordenamento do território; estudos de mercado para estabelecimento de novas empresas; estudos de melhoria de percursos; e, na área científica, em estudos de impacto ou degradações ambientais.

O *software* de geoprocessamento denominado ArcGIS™ foi desenvolvido pela empresa norte americana ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) no fim da década de 1990 e se apresenta atualmente como uma plataforma de última geração em análises em ambiente SIG (ESRI, 2018).

Diferenciando-se de outros, Cavalcante (2015) apresenta o ArcGIS como um sistema com características próprias, a título de exemplo, a capacidade de interagir com outros aplicativos como o Google Earth, exportando/importando arquivos e imagens. Além disso, o fato de apresentar a localização geográfica dos dados possibilita análises mais complexas das transformações ocorridas no espaço.

A partir da capacidade do *software* em apresentar, além de ferramentas para o desenvolvimento de mapas, critérios para explorar informações sobre uma localização, a elaboração e análise de dados podem ser realizadas de forma totalmente automatizada. Em relação ao estudo do desencadeamento dos processos erosivos, desde a identificação dos mesmos, do entendimento da relação com os parâmetros declividade, fluxo acumulado, até ao cálculo e cruzamento dos dados podem ser realizados em tal *software*.

Assim, dentro de todos os âmbitos de utilização dos SIGs, de acordo com Câmara et al. (2001), o geoprocessamento no Brasil se apresenta como uma ferramenta de grande potencial, auxiliando na falta de informações existentes para a administração do espaço urbano e ambiental de todo o território.

2.4.2 Sensoriamento Remoto

A tecnologia espacial tem se tornando uma ferramenta cada vez mais importante, em que os satélites são utilizados para comunicação, navegação, observação e até para exploração científica das informações. Uma característica importante para os estudos de fenômenos naturais é o fato de os sistemas incluírem o Sistema de Posicionamento

Global (GPS), que permite uma rápida determinação do local onde as medições e pesquisas estão sendo feitas.

Tendo em vista a dificuldade de se obter dados, principalmente para grandes áreas, as informações espaciais oriundas de sensores a bordo de satélites, apresentam-se como essenciais para estudos de degradação da terra, principalmente pela disponibilidade de materiais de forma gratuita. Atualmente, diversos dados de satélite estão disponíveis na internet, ampliando o uso do sensoriamento remoto para diversos públicos (VRIELING et al, 2005).

De acordo com Geymen (2014), o sensoriamento remoto compreende sistemas ativos e passivos. Os sensores passivos captam a radiação natural que é emitida pelos objetos observados; já os ativos, produzem sua própria energia eletromagnética, permitindo assim, a coleta de dados em quase todas as condições atmosféricas, durante o dia ou à noite. Os sistemas ativos são frequentemente usados para gerar Modelos Digitais de Elevação (MDE), tendo em vista a capacidade de cobrirem grandes áreas e não dependerem da radiação solar e da cobertura de nuvens.

Além disso, os dados são também classificados de acordo com a faixa espectral de operação, tendo em vista que cada faixa do espectro eletromagnético compreende um comprimento de onda. Assim, podem ser divididos em ópticos, termais e de radar. O sistema radar é um sistema ativo de sensoriamento, já que não depende da energia eletromagnética do Sol para obter informações remotas da superfície terrestre. A radiação eletromagnética necessária é produzida pelo próprio sistema, em que, após a transmissão da mesma, o sensor detecta a energia que foi espalhada pelo terreno, mensurando a intensidade da radiação de retorno (VIANA, 2012).

Essa tecnologia tem se mostrado com grande potencial para a avaliação de erosões, tanto por meio da detecção direta de características de erosão, quanto para avaliação dos fatores decisivos no processo erosivo, como topografia e cobertura vegetal. Para esse fim, é fundamental que a escolha do produto leve em consideração a resolução e outros princípios, os quais serão apresentados na sequência (VRIELING et al, 2005).

2.4.2.1 Produtos de radar

O termo Radar significa *Radio Detecting and Ranging*, ou seja, Detecção e Medida de Distância por Rádio. A fim de detectar os alvos, as ondas de radar de dispersão tocam a superfície como uma onda de laser, a energia é retroespalhada e, depois disso, parte dessa energia retorna para a antena do sensor. Como resultado, o radar

determina a distância e o ângulo até os alvos, por meio do envio e recepção de pulsos de energia ativa de micro-ondas (MAKINECI e KARABORK, 2016).

A capacidade do sensor em identificar os alvos é relacionada com os diferentes sinais de retorno (retroespalhamento) que cada um produz, alterando, assim, as características e resolução da imagem final. Com isso, torna-se fundamental o entendimento da interação do sensor com os alvos na superfície terrestre, cujo elo é a radiação eletromagnética - REM (BERNINI, 2016).

Nesse contexto, Chaves et al. (2000) apontam a necessidade de considerar dois tipos de propriedades, quando se utiliza produtos de radar: questões relacionadas com as características do alvo (rugosidade do terreno, relevo, estrutura da vegetação e umidade do solo e das plantas); e questões das características instrumentais do sensor (polarização, comprimento de onda, ângulo de incidência e direção de visada), visto que, a capacidade de discriminação dos objetos no solo depende também da configuração do sistema.

Os sistemas de radar podem ser diferenciados em não imageadores (escaterômetros, espectrômetros e altímetros) e imageadores, que compreendem os sistemas de antena rotatória, os radares de visada lateral de abertura real (SLAR) e os radares de visada lateral de abertura sintética (SAR) (BERNINI, 2016).

O primeiro satélite com SAR surgiu em 1978 e desde então diversas alterações foram realizadas objetivando a melhoria da resolução espacial de imagens obtidas de plataformas aéreas (PARADELLA et al., 2015). Trata-se de um sensor ativo que usa a banda de microondas no amplo espectro de radiofrequência, fator este que permite a penetração nas nuvens e, dependendo da banda, até das copas de árvores (OUCHI, 2013).

Ainda segundo Ouchi (2013), em relação às bandas, a “L” e a “P” possuem profundidade de penetração relativamente longa na vegetação e no solo, permitindo extrair algumas informações sobre o interior dos alvos. Assim, quanto maior o comprimento de onda do pulso eletromagnético emitido, menor a interferência do dossel e melhores informações são obtidas do terreno (Figura 7). Em virtude de tais fatores, o SAR tem sido usado em vários campos de pesquisa, como geologia, agricultura, silvicultura, hidrologia, urbanismo, oceanografia e arqueologia.

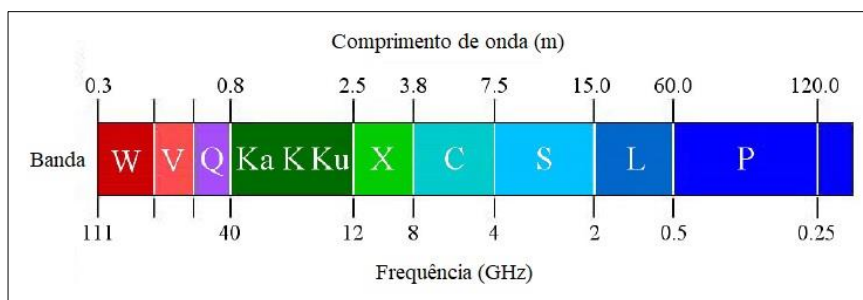


Figura 7 - Bandas do espectro de micro-ondas usado para SAR.

Fonte: Ouchi (2013).

Os sistemas mais comuns utilizam comprimento de onda nas bandas X, C ou L, que se referem respectivamente aos sensores SRTM, Sentinel-1 e Palsar-1. A Tabela 5 apresenta informações referentes ao imageamento produzido por tais radares.

Tabela 5 - Características dos sistemas orbitais com SAR.

	Agência/País	Ano de lançamento	Resolução	Banda	Polarização
SRTM	NASA/EUA DLR/Alemanha	2000	30 m	X	dual
Palsar-1	JAXA/Japão	2006	12,5 m	L	quad
Sentinel-1	ESA	2014	10 m	C	dual

Fonte: Adaptado de Ouchi (2013).

A partir das imagens de radar, por meio de processamentos automáticos, podem ser obtidos outros produtos. Dentre eles, destaca-se o Modelo Digital de Elevação, tendo em vista que a imagem capta as informações do terreno, atribuindo as devidas altitudes.

- Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido de radar

Um Modelo Digital de Elevação apresenta a situação física e topográfica da terra em um arquivo matricial, em que as linhas e colunas georreferenciadas apresentam registros altimétricos, ou seja, cada *pixel* contém um valor de elevação. Para que seja uma representação fiel da topografia, tais registros devem se referir à altitude do relevo no local (VALERIANO, 2008).

O método tradicional de obtenção do modelo é a partir da digitalização de mapas topográficos (curvas de nível e hidrografia) e posterior interpolação dos dados. Já os métodos atuais são os processamentos automáticos obtidos de imagens de satélite e imagens de radar (radargrametria, interferometria), substituindo as técnicas de

digitalização manual e de fotogrametria anteriormente utilizadas. (MAKINECI e KARABORK, 2016).

Os MDE podem ser utilizados em diversas áreas, tais como projetos de engenharia e infraestrutura, segurança, aviação, energia, arqueologia, silvicultura, gerenciamento dos recursos naturais, além de desastres e análises de risco. Dependendo do seu uso, ou seja, da necessidade de precisão, Geymen (2014) aponta a importância de correções específicas no modelo, visto que a precisão do MDE derivado de SAR pode apresentar variações de acordo com as características da superfície local.

De acordo com Valeriano (2008), os dados topográficos advindos de sensores podem apontar a presença de objetos não topográficos, tais como construções e árvores. Assim, ressalta-se a presença do efeito dossel (cobertura vegetal), erros de identificação e mesmo a simplificação da realidade realizada durante a interpolação dos dados, para a representação em *pixels*.

Com base nos resultados de seu estudo realizado na Turquia, em que comparou um MDE obtido da carta topográfica, com um obtido pelo método de interferometria por radar, Geymen (2014) pôde concluir que o último não ofereceu um nível de precisão apropriado para fins cartográficos. Porém, afirma que, tais materiais são úteis para áreas muito grandes, em comparação com métodos convencionais de topografia, visto a economia financeira e temporal.

Tal questão também foi confirmada por Niipele e Chen (2019), que analisaram a eficácia do MDE do radar Alos/Palsar para a extração de redes de drenagem da Namíbia. No estudo foi notada a necessidade de pré-processamentos no modelo, pois embora apresente alta resolução, não está livre de ruídos e erros que possam afetar a extração adequada de recursos hidrológicos e geomorfológicos. Tais erros podem ser tanto de fatores naturais (depressões e vegetação), de métodos de obtenção, como também antropogênicos, em que no caso, cercas e pontes também eram identificadas como rede de drenagem.

Portanto, esses erros foram eliminados pelo condicionamento do MDE, por meio da eliminação de possíveis depressões existentes (com métodos de preenchimento); além da suavização do modelo, a fim de preservar a morfologia predominante do relevo (estatística focal). Por fim, os autores concluíram que, com as devidas correções, o MDE do Alos/Palsar se apresentou muito eficiente para a extração da drenagem, com potencial para compor o mapa hidrográfico atual da área, ajudando no desenvolvimento de medidas de mitigação de inundações e secas.

- **Alos/Palsar**

O satélite ALOS foi lançado em 2006 pela *Japan Aerospace Exploration Agency* – JAXA, com o objetivo de oferecer subsídios principalmente para o monitoramento de desastres e recursos naturais. Entrou na fase operacional e fornecimento de dados ainda em 2006 e deixou de operar em 2011 (EMBRAPA, 2013).

Segundo Gomes et al. (2007), a plataforma contava com três sensores: o radiômetro PRISM (*Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping*), capaz de adquirir imagens tridimensionais detalhadas da superfície terrestre; o AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2*), para os mapeamentos de uso e cobertura da terra; e o sensor PALSAR (*Phased Arraytype L-band Synthetic Aperture Radar*), responsável pela obtenção de imagens diurnas e noturnas sem a interferência de nuvens.

Destaca-se o sensor PALSAR, tendo em vista sua capacidade de adquirir imagens em quaisquer horários e condições climáticas, sendo essencial para estudos realizados em regiões de clima tropical que contam com grande nebulosidade.

Os trabalhos atuais geralmente utilizam as imagens de radar da plataforma Alos/Palsar referindo-se, em grande maioria, a mapeamentos de uso e cobertura da terra e detecção de áreas alagadas; ou seja, técnicas de classificação de imagem.

Em continuação do projeto, a Agência Espacial JAXA lançou em 2014 a missão ALOS-2 / PALSAR-2, que apresenta maior resolução, largura de faixa ampla e qualidade de imagem. Tal melhoria permitirá o estudo e monitoramento em áreas mais extensas, fornecendo aos usuários dados mais detalhados que o ALOS / PALSAR. Porém, atualmente os dados ainda não estão disponíveis de forma gratuita (JAXA, 2020).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano (BHRP), área de estudo desta pesquisa, localiza-se na região centro-leste do estado de São Paulo, entre as coordenadas UTM 7552000/7596000m S e 212000/232000m E, Datum Sirgas 2000, zona 23 K. Com uma área de 392 Km², compreende áreas rurais dos municípios de Analândia, São Carlos e principalmente Descalvado.

O principal rio é o Ribeirão do Pântano que nasce na cidade de São Carlos, a 900 m de altitude e percorre aproximadamente 45 km até desaguar no Rio Mogi-Guaçu, localizado na cidade de Descalvado (PEREZ-JUNIOR e GARAVELLO, 2007).

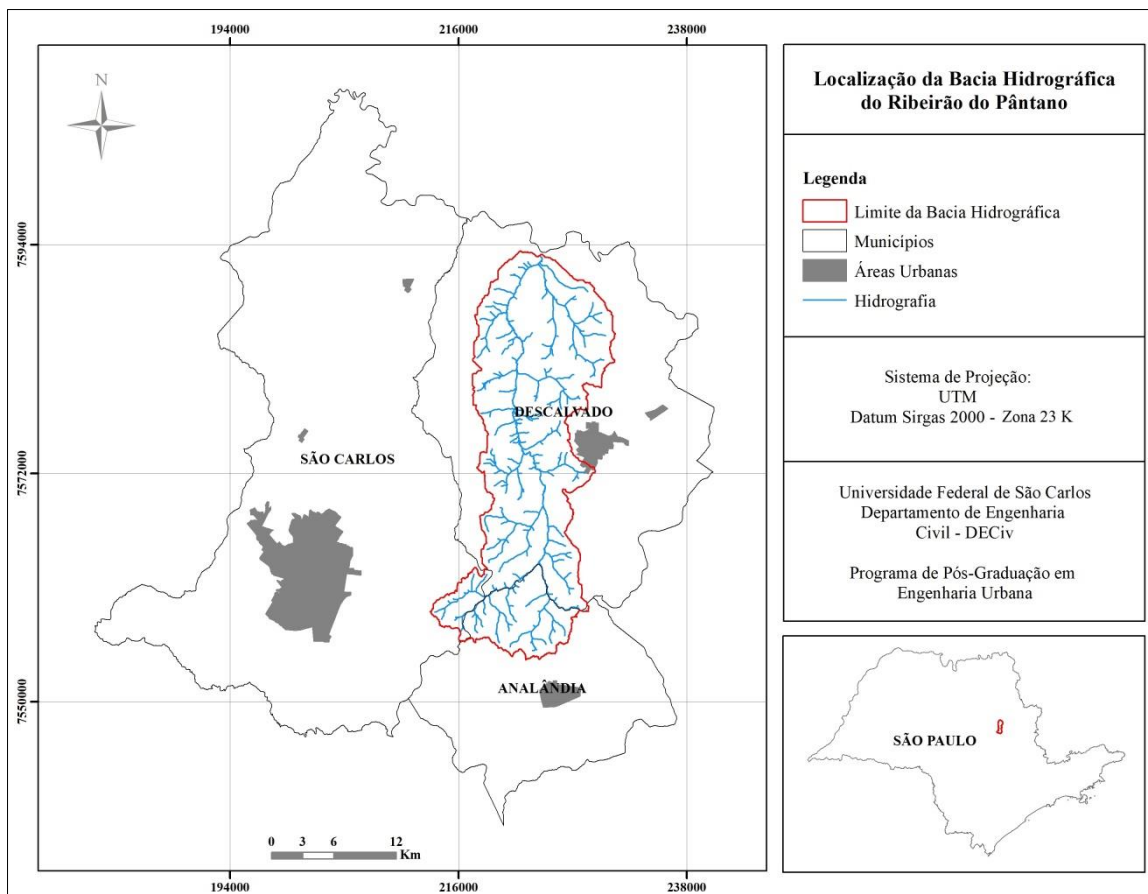


Figura 8 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano.

- **Analândia**

Analândia localiza-se a 221 km da capital, com aproximadamente 326 km² de área. Sua população em 2010 era de 4.293 pessoas, sendo estimados 4.995 em 2019. O PIB per capita é 32.880,30 reais e IDHM (2010) de 0,754 (IBGE, 2020). De acordo com Leite (2002), a economia local gira em torno do turismo, com a presença de cavernas e cachoeiras, em virtude de seu relevo delimitado entre a Depressão Paulista e as *Cuestas* Arenito-Basálticas. Com isso, os pontos turísticos principais são a Serra do Cuscuzeiro e Serra Atalaia (*Cuestas*), morro do Cuscuzeiro (elevação de 900m) e do Camelo.

Visando a proteção das áreas de recarga do Aquífero Guarani, da vegetação natural e das *Cuestas* Arenito-Basálticas (borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná), foram criadas na cidade duas Unidades de Conservação – Área de Proteção Ambiental

(APA), que se sobrepõem. A primeira, APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá (perímetro Corumbataí) foi criada pelo Decreto Estadual nº 20.960, de 1983; e a segunda, APA Piracicaba Juqueri-Mirim Área I, criada pelo Decreto Estadual nº 26.882, de 1987 e Lei Estadual nº 7.438, de 1991 (FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2018).

Parte da sua área rural, ao norte do município, está contida na Bacia Hidrográfica Mogi Guaçu (UGRHI 9), enquanto a porção centro-sul está na Bacia Hidrográfica Piracicaba, Capivari e Jundiá – PCJ (UGRHI 5) e, uma pequena área a oeste, na Bacia Hidrográfica Tietê Jacaré (UGRHI 13).

O relatório da UGRHI 9 de 2018, referente à Bacia do Ribeirão do Pântano, com dados de 2012 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, apontou a quantia de 22 erosões na área rural do município, enquadrando o município na classe alta de criticidade à erosão.

- **Descalvado**

O município de Descalvado localiza-se a 242 km da capital, com área de aproximadamente 754 km². Sua população em 2010 era de 31.056 pessoas, com estimativa de 33.719 em 2019. O PIB per capita é 49.281,66 reais e IDHM (2010) de 0,760 (IBGE, 2020).

A fim de proteger suas riquezas naturais e buscar a conservação e uso sustentável dos recursos naturais, o município conta com uma APA (Área de Proteção Ambiental), na região rural centro-sul, totalizando 50% de sua área (EMBRAPA, 1995). Tal área foi criada pela Lei nº 1.606, de junho de 1996, que delimitou seu traçado de acordo com os dois rios principais, o Ribeirão do Pântano e o Rio Bonito. A APA, por meio do zoneamento realizado de acordo com a fragilidade local, tem como um de seus objetivos impedir atividades que provoquem erosões.

A Bacia Hidrográfica em que Descalvado se encontra totalmente contido é a Mogi Guaçu (UGRHI 9). O relatório da UGRHI 9 de 2018, com dados de 2012 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, apontou a quantia de 4 erosões na área urbana e 106 na área rural, enquadrando o município na classe média de criticidade à erosão.

- **São Carlos**

São Carlos localiza-se a 254 km da capital, com aproximadamente 1.136,907 km² de área. Sua população em 2010 era de 221.950 pessoas, com estimativa de 251.983 em 2019. O PIB per capita é 42.568,73 reais e IDHM (2010) de 0,805 (IBGE, 2020).

Assim como Analândia, São Carlos também conta com a APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá (perímetro Corumbataí), criada pelo Decreto Estadual nº 20.960, de 1983, com o objetivo de proteger as *Cuestas* Arenito-Basálticas, as formações geomorfológicas, áreas de recarga do Aquífero Guarani e toda a vegetação natural (FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2018).

Parte da área rural, ao norte do município, está totalmente contida na Bacia Hidrográfica Mogi Guaçu (UGRHI 9), enquanto a porção centro-sul, englobando a área urbana, está na Bacia Hidrográfica Tietê Jacaré (UGRHI 13). O relatório da UGRHI 9 de 2018, com dados de 2012 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas apontou a quantia de 86 erosões na área rural, enquadrando o município na classe média de criticidade à erosão.

3.2 Clima

O clima da região onde se localiza a BHRP é classificado como Cwa, Subtipo Clima Tropical Úmido Seco, em que o inverno é seco e o verão chuvoso. No mês mais frio, a temperatura média é inferior a 18°C, enquanto no mês mais quente, a temperatura é acima de 23°C. Quanto ao índice pluviométrico, a quantidade de precipitação varia entre 27 e 270 mm mensais e média anual de 1500 mm (MORAES e LORANDI, 2009).

3.3 Vegetação

Em estudo realizado na APA de Descalvado, as principais formações vegetais encontradas foram cerrado, mata mesófila (mata estacional semidecídua) e mata ciliar. Alguns remanescentes de vegetação encontram-se dispersos em manchas relativamente isoladas, em meio à ocupação agrícola, cuja maior reserva atinge cerca de 1000 hectares. O levantamento da vegetação natural, relacionado com a declividade do terreno, apontou predomínio das mesmas em áreas com declive acima de 60%, reduzindo sensivelmente em locais abaixo de 20% (EMBRAPA, 1995).

De acordo com Barbosa (2010), nestes fragmentos de vegetação nativa habitam espécies animais raras, cujos registros apontaram a presença do lobo guará (*Chrysocyon brachyurus*), urubu-rei (*Sarcoramphus papa*), veado-mateiro (*Mazama americana*) e do sauá (*Callicebus personatus*), o que mostra a importância da preservação local.

3.4 Substrato Rochoso

A geologia da BHRP é composta por rochas das seguintes formações: Botucatu, Piramboia, Serra Geral, Suítes Básicas, Depósitos Aluviais e Depósitos de Cimeira (Figura 9).

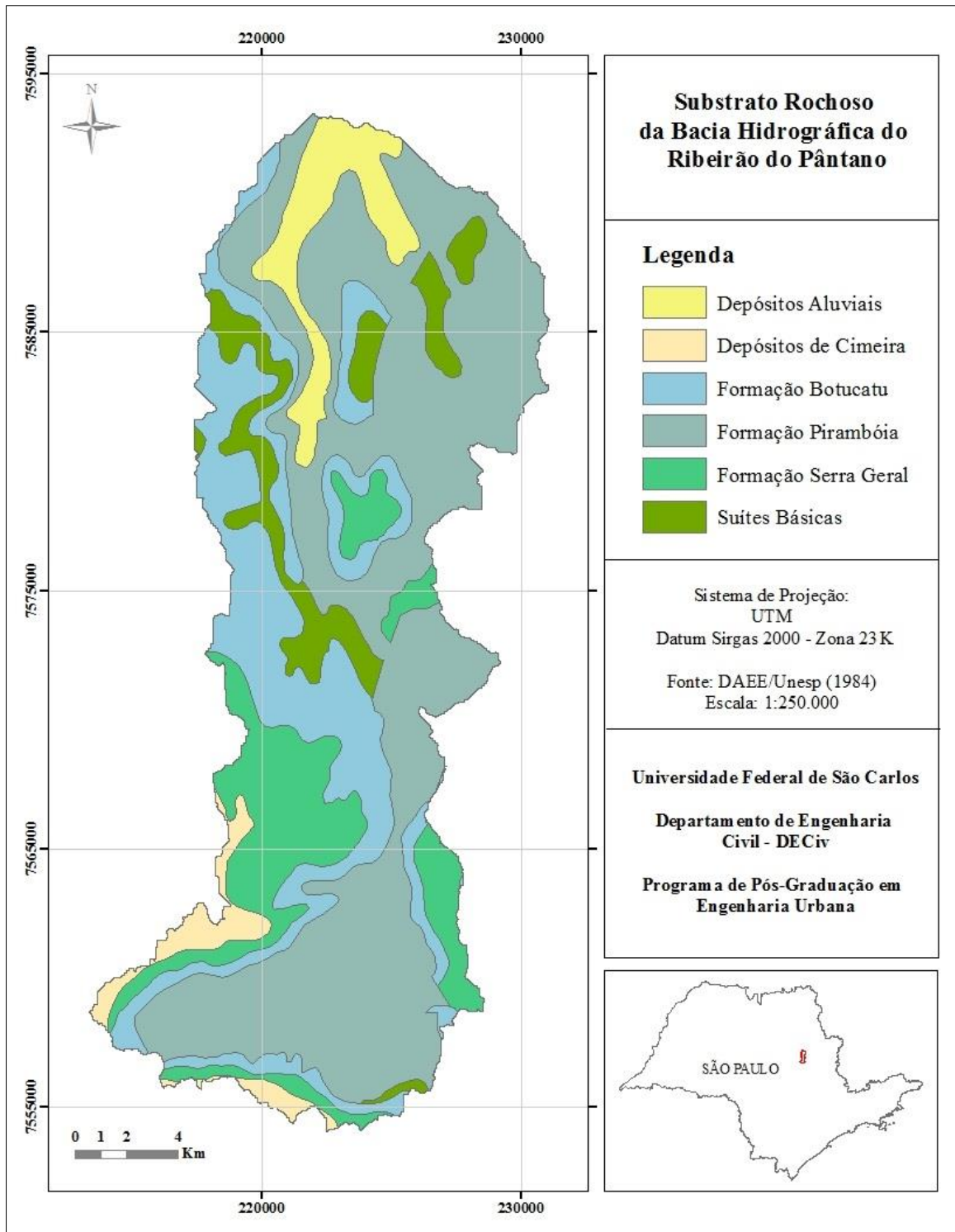


Figura 9 - Mapa de Substrato Rochoso da Bacia do Ribeirão do Pântano.

A seguir, é apresentada uma breve descrição das principais unidades identificadas, em ordem de extensão na bacia: Piramboia (49%), Botucatu (22%) e Serra Geral (14%).

- **Formação Piramboia**

Os arenitos da unidade Piramboia possuem a granulometria com variação entre silte grosso e areia fina, com predomínio da areia muito fina. A distribuição granulométrica apresenta de 62 a 85% de areia, com porção argilosa variando entre 5,5 e 20%. A espessura máxima da formação é comumente 130 m (MASSOLI, 1981).

Com origem no período Triássico, trata-se de uma das unidades sedimentares mais abrangentes no centro-leste de São Paulo. Sua ocorrência se dá principalmente em encostas escalonadas e extensos areais sobre as colinas. Tandel (1993) afirmou que os arenitos desta formação possuem granulação menor e são mais argilosos que os da Formação Botucatu.

No município de Analândia, as rochas caracterizam-se como camadas de arenitos finos a médios, intercaladas com conglomerados arenosos ou arenitos conglomeráticos, com seixos de quartzo arredondados, ou ainda intercaladas a camadas de argila arenosa (ABREU, 2007).

- **Formação Botucatu**

A unidade Botucatu, originada durante o Jura-Cretáceo, é caracterizada por arenitos de cores rosadas, avermelhadas e, em menor escala, amareladas, com estratificação cruzada de porte médio a grande e tangencial na base. A espessura da formação é bastante variável, cuja média é de 50 a 70 m, em que raramente ultrapassa 150 m.

A granulação dos arenitos varia entre areia média e muito fina, em que predomina a areia fina. Sua distribuição granulométrica representa 81 a 95% de areia, composta por grãos essencialmente de quartzo contendo uma matriz argilosa com variação de 2,3 a 11,4%. O Arenito Botucatu decompõe-se facilmente, produzindo solos arenosos bastante espessos, sendo, então, muito sujeitos à ação erosiva, razão pela qual é comum o aparecimento de voçorocas (MASSOLI, 1981).

De acordo com Barbosa (2010), os materiais das Formações Botucatu e Piramboia são oriundos de relevo pouco acidentado, provenientes de rochas cristalinas e sedimentares já existentes, depositados em bacia estável, com transporte prolongado. Tais

formações constituem o Aquífero Guarani, em virtude da alta porosidade, permeabilidade, continuidade e dimensão.

- **Formação Serra Geral**

A unidade Serra Geral, também estruturada durante o Jura-Cretáceo, é composta por derrames basálticos, oriundos de vulcanismo de fissura, além de intrusivas básicas associadas, formadas por "sills" e diques de diabásio.

Uma das intrusões significativas na região, na forma de "sills" (dentro da Formação Piramboia), tem aproximadamente 60 m de espessura e provoca no Rio Mogi Guaçu o aparecimento das corredeiras do Pântano. Tal intrusão tem continuidade para o município de Descalvado, acompanhando o curso do rio. Diques e "sills" também são características da Formação Botucatu (MASSOLI, 1981).

Além disso, basaltos desta formação também foram identificados no topo da Serra do Cuscuzeiro, abaixo das litologias da Formação Itaqueri (ABREU, 2007).

3.6 Geomorfologia

Quanto às unidades geomorfológicas, a Bacia Hidrográfica do Mogi Guaçu possui quatro grandes províncias: Planalto Atlântico, Depressão Periférica, *Cuestas* Basálticas e Planalto Ocidental. Na região norte da BHRP, para entrar em seu baixo curso, o Rio Mogi Guaçu transpõe as *Cuestas* do Planalto Ocidental Paulista, em leitos que predominam os basaltos, solos da classe Latossolo Roxo (Latossolo Vermelho) e o relevo variando de vertentes plano-convexas a convexas de topos aplanados baixos a médios (STORANI, 2010).

Inserida no contexto da Serra Geral, uma macro feição geomorfológica do Sudeste na América do Sul, a BHRP se localiza na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, apresentando as Unidades Morfoesculturais: Planalto Ocidental Paulista, subdividido em Planalto Residual de São Carlos e Patamares Estruturais de Ribeirão Preto e Depressão Periférica Paulista, subdividida em Depressão Mogi-Guaçu (BARBOSA, 2010).

De acordo com Ross e Moroz (1996), o Planalto Ocidental Paulista localiza-se sobre o Grupo Bauru, com formações areníticas e locais com exposição de basaltos; apresenta relevo levemente ondulado, com predomínio de colinas amplas e baixas. Já a Depressão Periférica Paulista apresenta características muito diversas, dependendo de fatores como influência tectônica, variação litológica e atuação de processos

morfodinâmicos. Em ambas Unidades Morfoesculturais, as formas de relevo são de denudação, ou seja, resultantes do desgaste erosivo, cujas morfologias do topo apresentam formas convexas (Dc) ou tabular (Dt). As características de solo e relevo de cada unidade são resumidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo das características morfológicas da Bacia do Ribeirão do Pântano.

Unidades Morfoestruturais	Unidades Morfoesculturais		Formas de Relevo			Solos dominantes	Litologia dominante
			Modelados	Altimetria	Declividade		
Bacia Sedimentar do Paraná	Planalto Ocidental Paulista	Patamares Estruturais de Ribeirão Preto	Colinas amplas e baixas: Dt11, Dt12, Dt13	500-700m	10-20%	Latossolo roxo	Basaltos
		Planalto Residual de São Carlos	Colinas topos aplanados: Dt11, Dc23, Dc22, Dc34, Dc33	600-900m	10-20% >30%	Latossolo vermelho- escuro	Depósitos arenosos argilosos
	Depressão Periférica Paulista	Depressão Mogi-Guaçu	Colinas topos amplos: Dt12	500-700m	10-20%	Latossolo vermelho-amarelo; Latossolo vermelho- escuro; Podzêlico vermelho-amarelo	Arenitos finos

Fonte: Adaptado de Ross e Moroz (1996).

As *Cuestas* Basálticas, relevo com escarpas íngremes de um lado e suave de outro, são constituídas por arenitos das formações Botucatu e Piramboia e por basaltos da Formação Serra Geral. Já o reverso da *cuesta*, relevo mais baixo e uniforme, é formado pelos arenitos da Formação Botucatu, revestido por sedimentos da Formação Santa Rita do Passa Quatro (MASSOLI, 1981).

A região norte da BHRP tem suas cotas altimétricas mais baixas, com aproximadamente 540 m, aumentando até 1040 metros até a região sul, com variadas formas de relevo (planícies, planícies de inundação, colinas, morrotes e morros altos), em que, em um de seus desníveis apresenta a Cachoeira do Pântano. A região mais baixa da bacia (foz) é formada por planícies de inundação, topografia que pouco interfere na formação de erosões; já ao sul da bacia (nascente), observam-se as formações de *cuestas* e morros, acentuando a declividade, o que torna o local mais propício ao desencadeamento dos processos erosivos. Quanto à região central, a topologia é intermediária (BARBOSA, 2010).

3.7 Pedologia

Com base no mapeamento realizado por Rossi (2017), foi possível levantar as seguintes classes de solos na BHRP: Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo, Nitossolo Vermelho, Neossolo Quartzarênico, Neossolos Litólicos e Gleissolos (Figura 10).

Considerando a região de estudo, Ferreira (2005) apontou que as classes Latossolos Vermelho Amarelo e Neossolos Quartzarênicos são predominantes na Depressão Periférica. Já os Neossolos Litólicos (textura argilosa) são encontrados no front das *cuestas*; enquanto no topo e reverso encontram-se Latossolos Vermelho-Escuro, Nitossolo e Latossolo Vermelho.

Além disso, Torezan (2005) afirma que, em ordem de domínio, os Latossolos apresentam destaque na bacia, seguido pelos Neossolos, Argissolos, Gleissolos e, por fim, os Nitossolos.

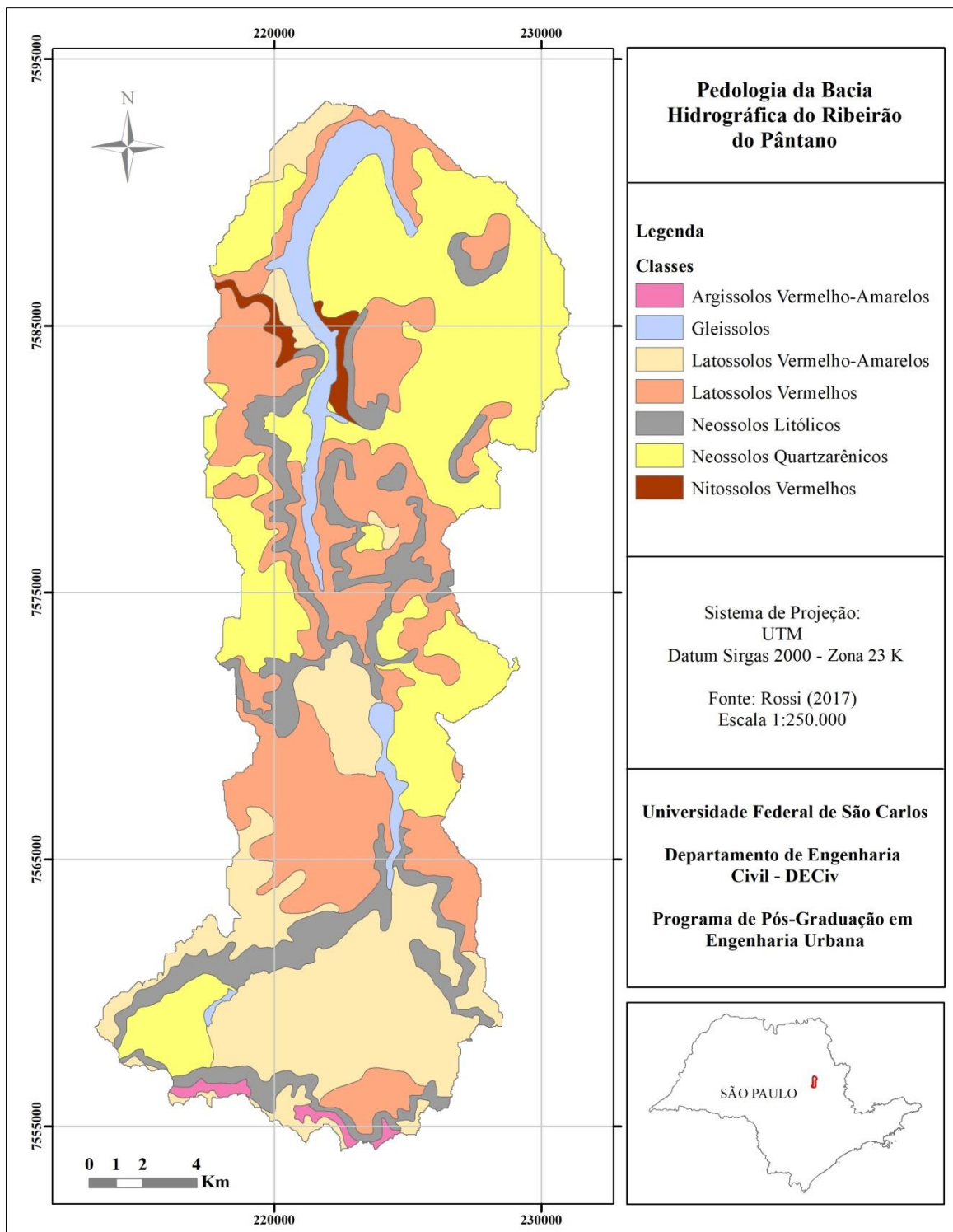


Figura 10 - Mapa de Pedologia da Bacia do Ribeirão do Pântano.

- **Latossolos**

A classe dos Latossolos forma a maior extensão do Estado de São Paulo, abrangendo 52% da área, que se localizam, em sua maioria, em regiões cujo relevo e propriedades do solo são favoráveis à agricultura extensiva (TOREZAN, 2005).

Ferreira (2005) realizou a caracterização dos Latossolos dividindo-os de acordo com os aspectos da paisagem, considerando relevo e geologia. No município de Analândia, foi possível associar os solos Latossolos Roxo, Vermelho escuro e Vermelho-amarelo às áreas de relevo suave ondulado ou plano e a geologia constituída de rochas básicas e metamórficas.

1) Latossolo Vermelho Escuro

Os Latossolos Vermelho Escuros são solos profundos, bem drenados e porosos. Tendo em vista o intemperismo existente na região e o retrabalhamento de arenitos, os solos desta classe são de textura média (FERREIRA, 2005). Podem também apresentar textura argilosa, quando derivam do intemperismo de rochas básicas e daquelas com material mais fino (AGUIAR, 1989).

2) Latossolo Vermelho Amarelo

De acordo com Ferreira (2005), na região de estudo, os Latossolos Vermelho Amarelo aparecem em manchas ao sul da bacia. Apresentam textura média com predominância de areias grossas e são solos muito profundos, resultantes do intemperismo dos arenitos. Aguiar (1989) aponta a origem de tal solo aos sedimentos do Grupo Bauru, além de rochas básicas da Formação Serra Geral.

Tais solos, de textura franco arenosa, apresentam-se mais suscetíveis à erosão, tendo em vista a baixa adesão e coesão; diferenciando-se dos mais argilosos (TOREZAN, 2005).

- **Argissolos**

Atrás dos Latossolos, os Argissolos são a segunda classe mais abrangente do Estado de São Paulo. A cor vermelha, característica dos solos de textura argilosa, ocorre em virtude da presença de solos originados de rochas básicas ou ricas em minerais ferromagnesianos, garantindo boa reserva de nutrientes.

1) Argissolo Vermelho Amarelo

Os Argissolos Vermelho Amarelo apresentam maior diferenciação de textura entre os horizontes A ou E e o horizonte B, quando comparados com os Argissolos Vermelho. Sendo assim, em mesmas condições de relevo, vegetação e uso do solo, o

Argissolo Vermelho Amarelo apresenta-se mais suscetível a erosão, visto que a mudança textural abrupta é fator decisivo para a erodibilidade (TOREZAN, 2005).

- **Nitossolos**

De acordo com Torezan (2005), a utilização deste solo limita-se ao fato de apresentar erodibilidade alta, sendo comum a formação de erosões quando utilizado inadequadamente.

- 1) Nitossolo Vermelho

O principal fator de diferenciação do Nitossolo Vermelho é a policromia, ou seja, a variação de cor em 150 cm a partir da superfície do solo; distinguindo-o dos Argissolos Vermelhos ou Vermelho-Amarelos. Assim, são mais vermelhos na maior parte dos 100 cm iniciais do horizonte B (SANTOS et al, 2018).

Ferreira (2005) aponta sua localização adjacente aos solos litólicos de substrato basáltico, que originam relevos muito movimentados e escarpados (características da Formação Serra Geral). Tal fator justifica a presença do Nitossolo na BHRP restringida à duas pequenas áreas próximas da Serra do Atalaia (TOREZAN, 2005).

- **Neossolos**

- 1) Neossolo Quartzarênico

O Neossolo Quartzarênico apresenta textura arenosa ou arenosa franca em todos os horizontes ou até os primeiros 150 cm; sendo essencialmente quartzoso, visto que nas frações areia grossa e fina apresentam 95% ou mais de quartzo (SANTOS et al, 2018). Assim, são solos profundos, pobres em nutrientes e com baixa capacidade de retenção de água.

- 2) Neossolo Litólico

Na BHRP, de acordo com Ferreira (2005), os Neossolos Litólicos estão associados ao substrato de diabásio, são eutróficos, com horizonte A moderado ou chemozênico e de textura argilosa. O perfil do solo é pouco espesso e está associado a altas declividades, predominantemente na borda e no front das *cuestas*, ou seja, em relevo bastante íngreme.

- **Gleissolos**

Os Gleissolos localizam-se geralmente em relevo plano e áreas adjacentes a rios e córregos. Por estarem associados à planície aluvionar, demonstram grande variação textural, podendo ser desde arenosa até argilosa.

Apresentam limitações impostas pela presença de lençol freático a pouca profundidade, em virtude de possível contaminação de aquíferos, tais como a impossibilidade de construção de aterros sanitários e recebimento de efluentes. Na região do estudo, Torezan (2005) aponta a ocorrência de Gleissolos do tipo solos hidromórficos.

3.8 Aspectos hidrológicos

A rede de drenagem que compõe a BHRP caracteriza-se por rede fluvial com vales mais profundos na região de cabeceira (sul) e tende a formar planícies de inundação nas proximidades do rio Mogi-Guaçu (norte). Os cursos d'água presentes ao longo da bacia apresentam extensão total de 205 km e a mesma possui densidade de drenagem de 0,92 km/km² (MORAES e LORANDI, 2010).

Quanto a sistemas aquíferos, a região compreende principalmente o Aquífero Guarani, reserva mais importante de água doce da América do Sul e uma das maiores do mundo. Assim, trata-se de importante fonte de abastecimento público, cujas águas são, em geral, de boa qualidade. Apesar disso, o Aquífero Guarani é considerado de alta vulnerabilidade à contaminação, visto que a formação rochosa principal é o arenito, o que facilita a penetração de poluentes (TOREZAN, 2005).

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos atuante na BHRP é a UGRHI 9 – Bacia Hidrográfica Mogi Guaçu, a qual ocupa praticamente toda a sua extensão.

3.9 Uso e ocupação do solo

O uso do solo na BHRP é essencialmente rural, tendo apenas em 2011 o início da expansão urbana, referente ao crescimento do município de Descalvado. Atualmente, a infraestrutura urbana na bacia representa aproximadamente 0,6 km², ou seja, 0,15% da área total.

Entre os anos de 1988 e 2018, pôde-se observar o grande avanço da agricultura, visto que áreas de pastagem deram lugar a novas culturas, principalmente de característica semi perene, ou seja, a cana de açúcar (Figura 11). Cabe ressaltar que o ano de 1988 foi escolhido para caracterização do uso do solo, pois os processos erosivos estudados na pesquisa foram identificados em imagens de tal ano, os quais serão

apresentados posteriormente, na descrição das erosões. Já o ano de 2018 é o mais recente divulgado pelo Projeto MapBiomias (MapBiomias, 2019), sendo então o uso mais atual para ser comparado.

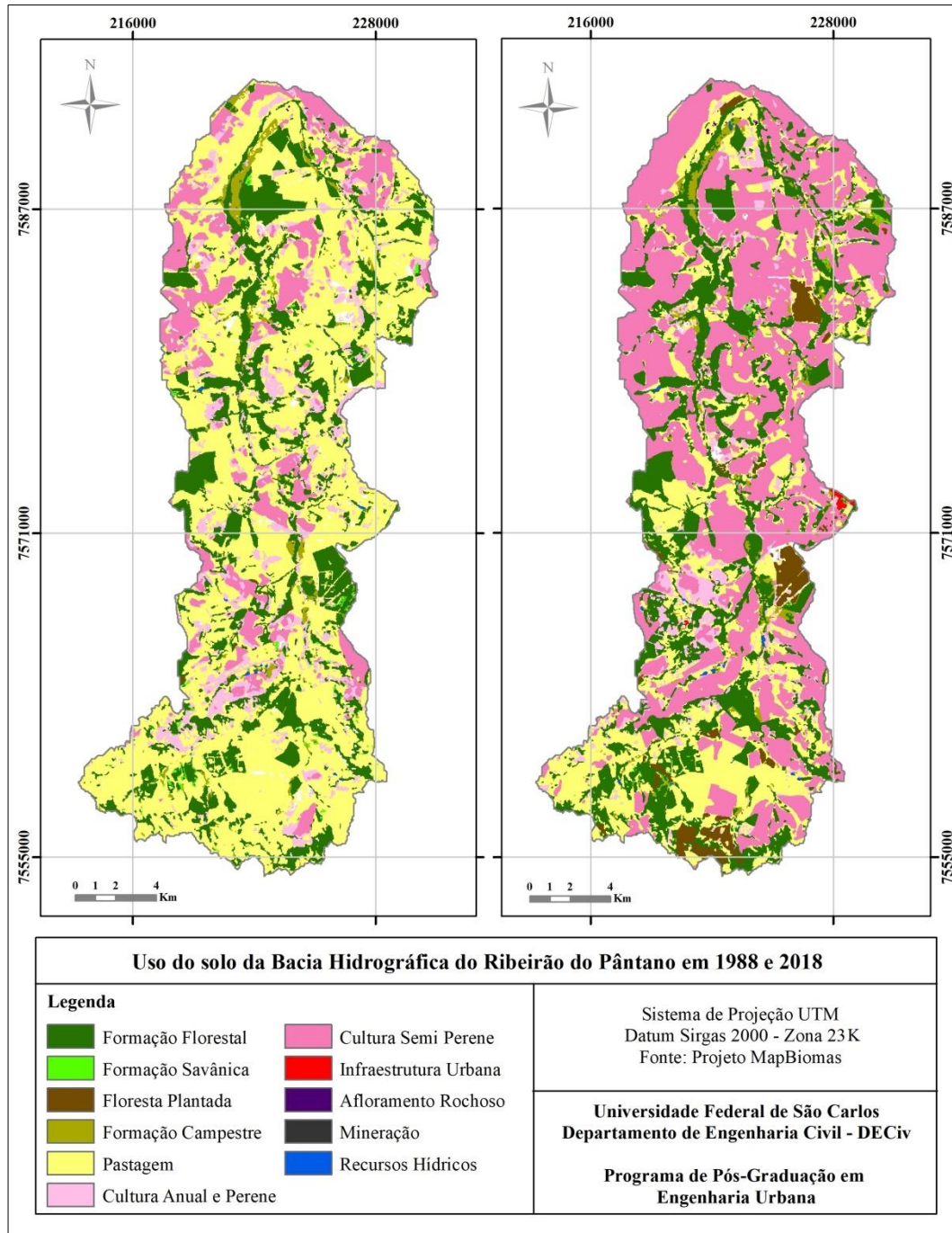


Figura 11 - Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia do Ribeirão do Pântano nos anos de 1988 e 2018.

Quanto à vegetação, as formações florestais (nativas e eucalipto) apresentaram diferença significativa, pois podem ser observadas três grandes áreas de florestas

plantadas na área. Além disso, a região iniciou um processo de mineração, localizada ao sul, no município de Analândia, cujo produto de extração é areia.

Assim, por meio da agropecuária, torna-se notório o crescimento da atividade antrópica, em que predomina o cultivo de cana de açúcar, ficando a vegetação nativa principalmente nas regiões próximas às margens dos rios (BARBOSA, 2010).

3.10 Trabalhos anteriores

A fim de realizar um levantamento de dados da BHRP e identificar a necessidade em questão de estudos, foi feita uma síntese de trabalhos já executados na bacia, voltados à caracterização socioambiental e planejamento territorial.

Tabela 7 - Trabalhos anteriores realizados na Bacia do Ribeirão do Pântano.

Referência	Tema
Perez-Junior e Garavello (2007)	Ictiofauna
Moraes e Lorandi (2008)	Cultivo de cana de açúcar
Moraes e Lorandi (2008)	Diagnóstico socioeconômico
Moraes e Lorandi (2008/2009)	Elementos da paisagem
Junqueira et al (2009)	Contaminação de aquíferos
Barbosa e Lorandi (2009a)	Vulnerabilidade (geologia)
Barbosa e Lorandi (2009b)	Dimensão interfluvial
Moraes e Lorandi (2010)	Ocupação do solo
Barbosa e Lorandi (2012)	Vulnerabilidade à erosão

Ao observar as temáticas abordadas na BHRP, é possível evidenciar os diagnósticos realizados nos meios físico, biótico e antrópico. A maioria dos mapeamentos foi desenvolvida em escala 1:50.000, havendo necessidade de maior detalhamento.

O estudo de vulnerabilidade à erosão, de Barbosa (2010), produziu uma carta de vulnerabilidade de acordo com a metodologia de Crepani et al (2001), em que considerou características físicas do local, como geologia, geomorfologia, pedologia, clima e uso e vegetação; classificando a bacia em moderadamente estável vulnerável e moderadamente vulnerável.

Já o presente estudo tem como principal aspecto inovador na área, o uso de modelos digitais provenientes de radar como base para a identificação de fatores que propiciem o surgimento de processos erosivos; analisando, além da característica do relevo (declividade), o uso dos processos erosivos existentes no local.

Com isso, o estudo e levantamento desses trechos críticos são fundamentais como embasamento para o desenvolvimento de projetos e obras de prevenção e contenção das

erosões, tanto em áreas rurais, quanto urbanas. Tal questão deve-se ao fato de que, ao considerar as erosões existentes, a intervenção antrópica também está sendo considerada, sendo, portanto, uma avaliação mais realista.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os itens apresentados na Tabela 8 referem-se aos materiais e *softwares* necessários para o desenvolvimento dos métodos.

O MDE do radar foi utilizado para gerar os parâmetros morfométricos; e os mapas temáticos existentes serviram como base de dados para caracterização da área. Já os *softwares* foram utilizados para auxílio na compilação e análise dos dados, além da elaboração de novos mapas e cartas.

Tabela 8 - Materiais e *softwares* utilizados.

Tipo	Nome/descrição	Autor/Fonte
Modelo Digital de Elevação	Alos 1 / Palsar 1	JAXA/Japão (2010)
Imagem	Imagens aéreas da BHRP	Base Aerofotogrametria e Projetos S. A. (1988)
Mapas e cartas	Carta topográfica (1:10.000)	IGC-SP (1970) / DataGEO
	Mapa de uso e ocupação do solo	Projeto MapBiomias
	Mapa de pedologia (1:250.000)	Rossi (2017)
	Mapa de substrato rochoso (1:250.000)	DAEE/Unesp (1984)
<i>Softwares</i>	Google Earth Pro	
	ArcGIS 10.5	
	TauDEM 5.3	

4.2 Métodos

A Figura 12 apresenta as etapas do desenvolvimento do trabalho, sendo elas: definição da área de estudo, compilação dos dados, definição e caracterização das erosões, processamento do MDE da Carta Topográfica, seleção do MDE do radar, suavização dos MDE e, por fim, elaboração do índice SxA.

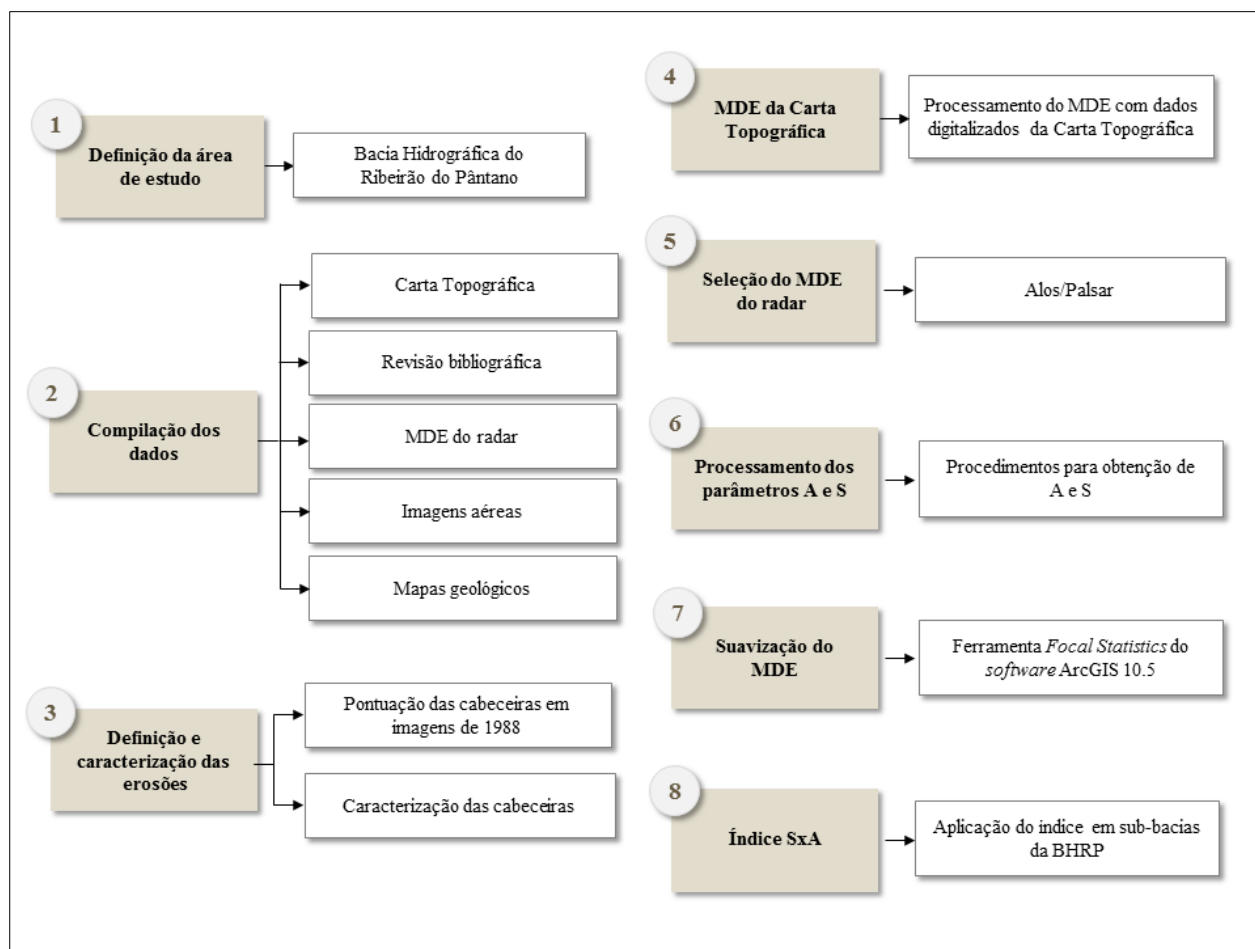


Figura 12 - Etapas adotadas no desenvolvimento do trabalho.

4.2.1 Definição da área de estudo

A escolha da bacia se deu pelo fato de que o relevo do local, mesmo em condições de média suscetibilidade à erosão, propicia a formação de processos erosivos importantes. Deste modo, observando o Cadastro de Processos Erosivos no Estado de São Paulo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2012), foi constatada a elevada ocorrência na região.

Assim, tendo em vista as características do meio físico, a BHRP se apresentou adequada para o desenvolvimento da pesquisa.

4.2.2 Compilação dos dados

Esta etapa inicial envolveu o levantamento de informações da área de estudo, tais como pesquisas bibliográficas, produto de radar, imagens aéreas, mapas e dados geológico-geotécnicos e arquivos vetoriais de trabalhos já desenvolvidos na região.

A maioria dos dados foi obtida em formato vetorial, na extensão *shapefile* (.shp), com exceção do mapa de uso e ocupação do solo, das imagens e do MDE, que encontram-se no formato raster.

Além disso, também foi realizada etapa de campo a fim de reconhecer a área e avaliar as características atuais das feições erosivas.

4.2.3 Definição e caracterização das erosões

- Definição dos pontos

A definição da cabeceira dos processos erosivos, de acordo com a metodologia do limiar crítico, deve ser realizada no início da sua formação, pois é nessa situação em que se encontra o limiar para o desenvolvimento da erosão.

Assim, foi buscado o registro mais antigo da região da BHRP, a fim de se obter maior precisão quanto ao início. Deste modo, as imagens utilizadas foram do ano de 1988, com escala 1:40.000, as quais estavam disponíveis no Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana, adquiridas da empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S.A (BASE, 1988).

As imagens foram digitalizadas e então georreferenciadas no *software* ArcGIS 10.5. Na sequência, todas as cabeceiras identificadas foram pontuadas, assim como representado na Figura 13.

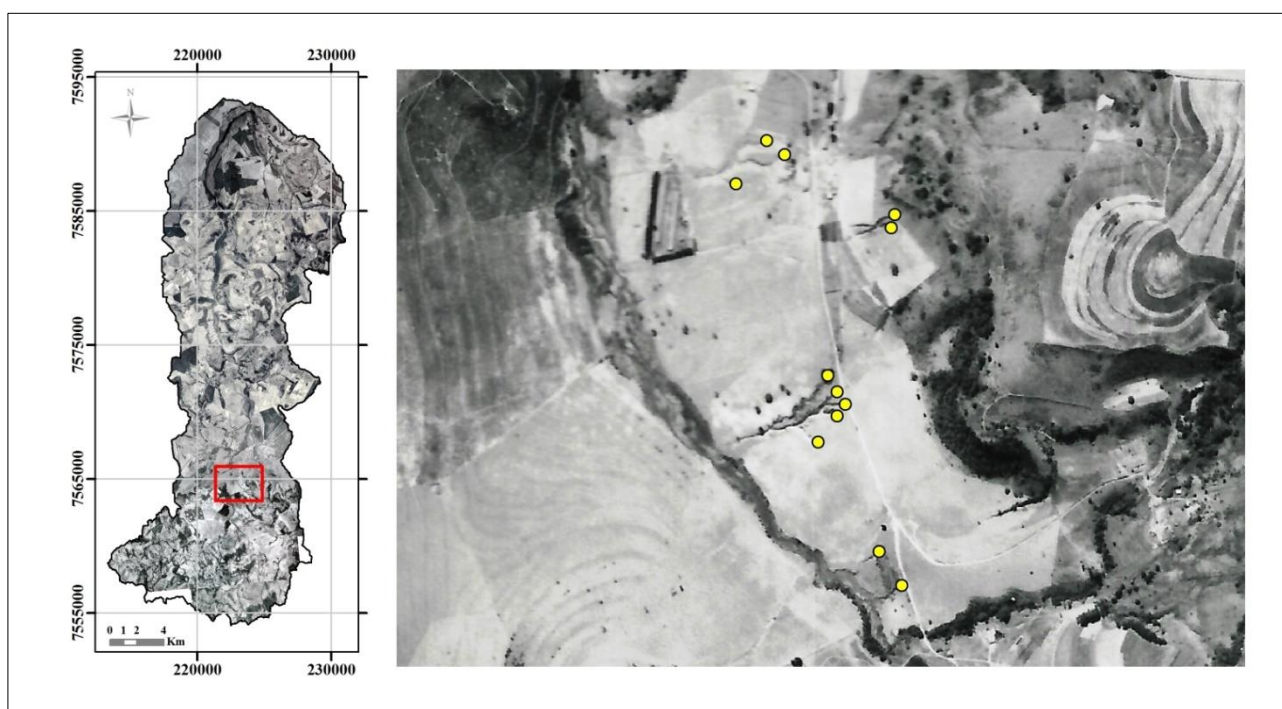


Figura 13 - Representação da forma de definição das cabeceiras dos processos erosivos.

- Caracterização das feições

Nesta etapa, os pontos de cabeceira das feições erosivas foram caracterizados com o objetivo de possibilitar análises e cruzamento de informações acerca da evolução e comportamento das erosões ao longo do tempo. As informações levantadas foram posição no relevo (encosta ou drenagem), substrato rochoso, e uso do solo (nos anos de 1988 e 2018).

A localização dos pontos das cabeceiras foi identificada nas imagens aéreas de 1988, com auxílio do *software* Google Earth Pro; o substrato rochoso foi levantado do mapa do DAEE/Unesp (1984); e o uso do solo, das informações do Projeto MapBiomias.

4.2.4 Processamento do MDE a partir da Carta Topográfica

O MDE obtido a partir da Carta Topográfica foi utilizado como forma de validação dos dados gerados com o MDE do Alos/Palsar, tendo em vista o uso da Carta ser o método clássico utilizado na literatura para a obtenção das áreas de contribuição.

Ressalta-se que o processamento e validação foram realizados para algumas áreas testes da BHRP, apresentados no item Resultados.

Para gerar o modelo, as curvas de nível, pontos cotados e hidrografia da Carta foram digitalizados no *software* ArcGIS 10.5 e usados como dado de entrada na ferramenta *Topo to Raster*. A resolução final do raster foi de 12,5m, assim como o MDE do Alos/Palsar.

4.2.5 Seleção do MDE proveniente do radar

A escolha do MDE do radar utilizado levou em conta os seguintes fatores: estar disponível gratuitamente, apresentar boa resolução e conter informações do terreno. Diante de tal situação, três MDEs foram comparados, em que dois deles foram desprezados para o uso em questão: o do radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), por apresentar resolução espacial de 30 m, não é compatível com a resolução necessária para o método empregado, o qual requer maiores detalhamentos; e do satélite Sentinel, visto que a banda em que opera (C) é afetada pela cobertura do dossel em áreas florestais, ou seja, não capta informações do terreno.

Portanto, o MDE adotado é o do sensor Palsar 1 (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), do satélite Alos 1 (*Advanced Land Observing Satellite*), proveniente de imagem capturada no ano de 2010. O modelo foi adquirido de forma gratuita no site ASF

Data Search (Alaska Satellite Facility), plataforma de download de dados de radar, da Universidade do Alasca (ASF, 2019).

4.2.6 Processamento dos parâmetros A e S

Este item apresenta, de forma geral, todos os procedimentos necessários para a obtenção dos parâmetros área de contribuição (A) e declividade (S).

- Áreas de contribuição

Para o cálculo das áreas de contribuição utilizou-se o algoritmo *D-Infinity* (Tarboton, 1977), que considera infinitas possibilidades de direção de fluxo distribuídas proporcionalmente entre os *pixels* vizinhos. Tal método foi escolhido tendo em vista a melhoria na representação do divisor de águas e distribuição de fluxo, em comparação com outros métodos, como o D8 (NEVES, 2017). O resultado gerado segue o mesmo princípio das ferramentas do *Hidrology* do ArcGIS, mas com algoritmos de interpolação diferentes, apresentando-se mais eficiente.

De acordo com Tarboton (1977), as direções de fluxo baseadas em Modelos Digitais de Elevação (MDE) são necessárias em estudos de hidrologia para determinar os caminhos do movimento de água, e, conseqüentemente, dos sedimentos e contaminantes. A área de contribuição é definida como a área de captação total acima de um ponto, no caso, o processo erosivo.

O procedimento de obtenção da área é baseado na representação do fluxo como um ângulo único, direcionado para o *pixel* vizinho com menor declive, considerando as oito facetas triangulares centradas em cada *pixel* (Figura 14). Assim, a direção do fluxo associada a cada *pixel* é calculada pela proporção do fluxo entre dois *pixels* cujo declive tende ao escoamento, com base no valor do ângulo (α) (TARBOTON, 1997; TESFA et al., 2011). A partir da direção de fluxo, é possível delimitar a área de confluência do fluxo acumulado até um determinado ponto, cujo comportamento depende da curvatura da encosta.

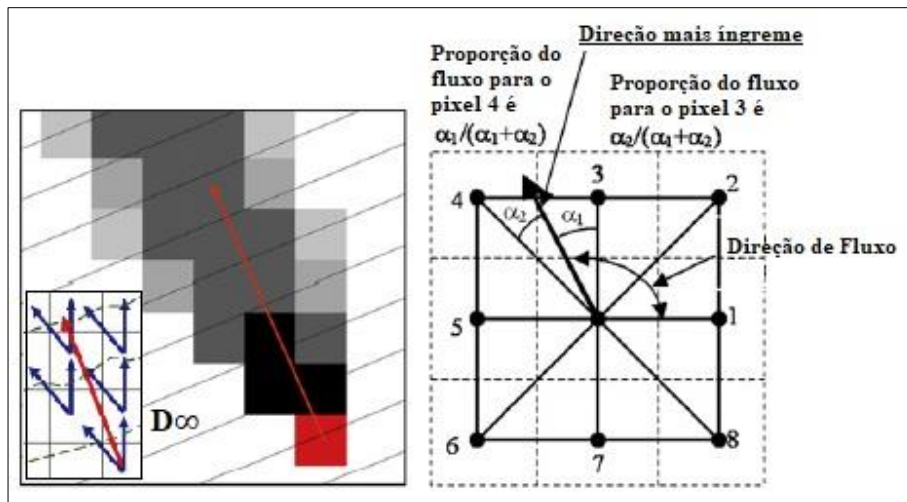


Figura 14 - Representação da direção de fluxo pelo método D_{∞} .

Fonte: Adaptado de Tesfa et al. (2011)

Para isto, utilizou-se o *plugin* TauDEM 5.3 (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), como extensão do *ArcToolbox*. A Figura 15 apresenta as etapas do processamento das áreas de contribuição, além das ferramentas necessárias existentes no *plugin*.



Figura 15 - Etapas do processamento das áreas de contribuição utilizando o TauDEM.

Inicialmente é realizada a correção dos *sinks*, ou seja, depressões/picos oriundos de erros aleatórios e sistemáticos do sinal detectado pelo radar. A ferramenta utilizada é denominada de *Pit Remove*, que atribui novos valores aos *pixels* com anomalias, com base nas informações dos vizinhos mais próximos, gerando um novo MDE.

Com o MDE corrigido, hidrológicamente consistente, o processamento da direção de fluxo se dá por meio da ferramenta *D-Infinity Flow Direction*.

A partir do *raster* de direção de fluxo, as áreas de contribuição devem ser processadas individualmente para cada erosão, utilizando como *inputs* o *raster* de direção

de fluxo e o ponto de cabeceira das feições, com a ferramenta *D-Infinity Contribution Area*.

Tendo as áreas já definidas, é necessário transformá-las em vetor, a fim de permitir o cálculo da sua extensão. Para tal processamento, o *pixel* das áreas deve ser do tipo “*integer*” e não “*float*”, como é gerado, sendo necessária uma conversão por meio da ferramenta *Reclassify*. Na sequência, o raster no tipo “*integer*” segue para a transformação para *shapefile*, por meio da ferramenta *Raster to Polygon*.

- Declividade

A declividade foi obtida por meio da ferramenta *Slope*, utilizando o MDE com o filtro “*Pit Remove*” como dado de entrada. Na sequência, as classes de declividades foram alteradas, sendo definidas conforme as recomendações do IG (1993) apud Neves (2017). A Tabela 9 apresenta as classes de declividade utilizadas, expressas em porcentagem, e suas características.

Tabela 9 - Classes de declividades e suas características.

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 problemas de erosão requerem práticas simples de conservação.
5 - 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio e rápido, porém com poucos problemas de erosão superficial.
10 - 15	Terrenos muito inclinados, ou colinosos, onde o escoamento superficial é rápido. Apresentam 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 de processos erosivos.
25 - 50	Terrenos fortemente inclinados a muito íngremes, com escoamento superficial muito rápido e com 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 exposição das rochas, extremamente susceptível a erosão.

Fonte: IG (1993) apud Neves (2017).

A partir da declividade gerada, com o intuito de se determinar a declividade média de cada área de contribuição, realizou-se um recorte com a ferramenta *Clip*, considerando como dado de entrada os arquivos *shapefile* das áreas produzidas anteriormente e a declividade, em *raster*, de toda a bacia.

4.2.7 Aplicação da ferramenta de suavização no MDE

A representação do MDE diretamente do Alos/Palsar se mostrou com muitos ruídos, nitidamente necessitando de um tratamento inicial para a suavização, visando à obtenção de parâmetros morfométricos relacionados aos processos erosivos de forma mais consistente com as características físicas do local.

De acordo com Neumann (2017), as curvas de nível extraídas diretamente de imagens de radar podem apresentar reentrâncias, ou seja, grandes saliências. Para isso, as mesmas precisam ser suavizadas para que reflitam a tendência natural do relevo local.

A ferramenta utilizada foi a *Focal Statistics*, do *software* ArcGIS 10.5, que calcula para cada *pixel* do raster uma estatística dos valores dentro de uma vizinhança especificada em torno dele.

A Tabela 10 apresenta as configurações adotadas para a realização do processamento.

Tabela 10 - Configurações adotadas no processamento com a ferramenta *Focal Statistics*.

Configurações	Definições
<i>Neighborhood</i>	<i>Circle</i>
<i>Cell</i>	5 e 10
<i>Statistics type</i>	<i>Mean</i>

Uma vizinhança circular é criada especificando um valor de raio, no caso, 5 e 10 *pixels*; e a estatística de média calculará a média dos valores da altitude dentro desse raio estabelecido, definindo um valor novo para cada *pixel*. Existem diversos tipos de raio e estatísticas disponíveis para se aplicar na ferramenta, sendo que a escolha foi feita por serem as configurações padrões do *software* e apresentarem resultados mais homogêneos.

A fim de se avaliar de forma mais efetiva a importância da suavização, foram utilizados dois valores de raio, para verificar o mais indicado, ou seja, qual deles apresentaria suavização satisfatória e condizente com o relevo, em que a área de contribuição atingiria o divisor de águas referente ao fluxo direcionado para a cabeceira da erosão.

Inicialmente outros valores de raio de suavização também foram testados, como 3 e 7 *pixels*. Assim, os valores 5 e 10 *pixels* foram escolhidos pois o valor mais baixo (3) mostrou suavização insatisfatória para a continuação do processamento; enquanto que a suavização máxima (10) foi adotada ao atingir os resultados esperados, sem expor à

possibilidade de perder informações do terreno, caso se aumente ainda mais a homogeneização dos valores do modelo.

Ressalta-se que a ferramenta também foi aplicada no MDE da Carta Topográfica, para que ambos os dados tivessem o mesmo tratamento, uma vez que mesmo a carta topográfica está longe de ser uma representação precisa do relevo real.

A Figura 16 representa o processamento da ferramenta, dando o exemplo de um raio de 2 *pixels*.

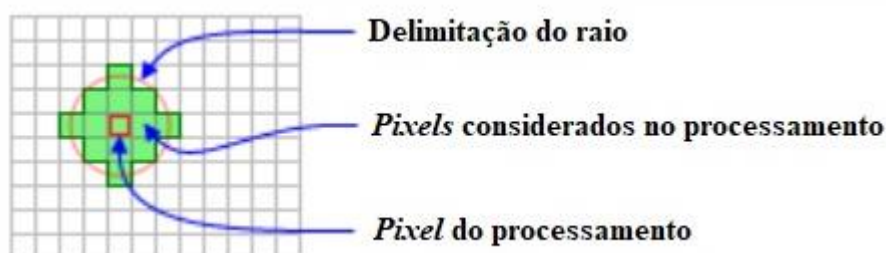


Figura 16 - Representação do processamento da ferramenta *Focal Statistics* com raio circular.

Fonte: ESRI (2017)

Por fim, as curvas de nível foram extraídas automaticamente dos MDE com e sem tratamento do Alos/Palsar, além dos MDE com e sem tratamento da Carta Topográfica. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Contour*, com um intervalo de 5 m.

As curvas foram utilizadas para comparar de forma qualitativa os resultados obtidos após a aplicação dos diferentes níveis de suavização tanto sobre a carta como sobre o MDE Alos/Palsar.

Para auxiliar na observação se as áreas de contribuição estavam se adequando ao relevo local, foi utilizado o *software Google Earth Pro*, que apresenta o terreno em 3D, facilitando a averiguação dos erros gerados nas áreas de contribuição.

4.2.8 Índice SxA

Os parâmetros área de contribuição (A) e declividade média (S) foram obtidos por meio dos arquivos individuais gerados nas etapas anteriores, em que A foi calculado em hectares (ha) e S, inicialmente em porcentagem, transformado para a unidade $m.m^{-1}$.

Todos os dados foram organizados em tabela no *software Excel*, o que permitiu que os parâmetros de cada feição fossem plotados no plano cartesiano e calculada a linha

de regressão, com a função potência (*Power Function*). A relação foi obtida de acordo com a função ($S = aA^{-b}$), proposta por Patton e Schum (1975).

Como a linha de regressão calculada não representa o limiar inferior dos dados analisados foi necessário seu ajuste, realizado de forma empírica. Assim, após tal ajustamento, foi calculado um novo valor de “a” referente ao ponto de erosão mais próximo do limiar crítico, ou seja, um novo valor para a posição da reta.

Os resultados de SxA apresentam a análise do limiar crítico de cada feição erosiva, possibilitando observar as características de cada uma, como posicionamento no relevo, ou até mesmo a existência de outros fatores de influência, além de S e A.

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos referem-se aos documentos cartográficos desenvolvidos, além dos processamentos realizados em SIG, tais como: processamento e tratamento do MDE, obtenção das áreas de contribuição, bem como a declividade média das mesmas; análise de correlação para validar os resultados e a aplicação do índice SxA.

5.1 Documentos Cartográficos

5.1.1 Mapa de Documentação

O Mapa de Documentação da BHRP resume todas as informações necessárias para o desenvolvimento da metodologia aplicada (Figura 17).

As curvas de nível e rede de drenagem foram obtidas do MDE do radar Alos/Palsar, por meio de técnicas de processamento em ambiente SIG, e convertidas para o sistema de projeção UTM “Sirgas 2000 - Zona 23 K”. Já as cabeceiras das feições erosivas foram registradas em imagens de 1988 (escala 1:40.000), totalizando 100 pontos.

Todas as feições foram caracterizadas de acordo com a sua posição, uso do solo e substrato rochoso do local da cabeceira, cujas informações se encontram na Tabela no Anexo.

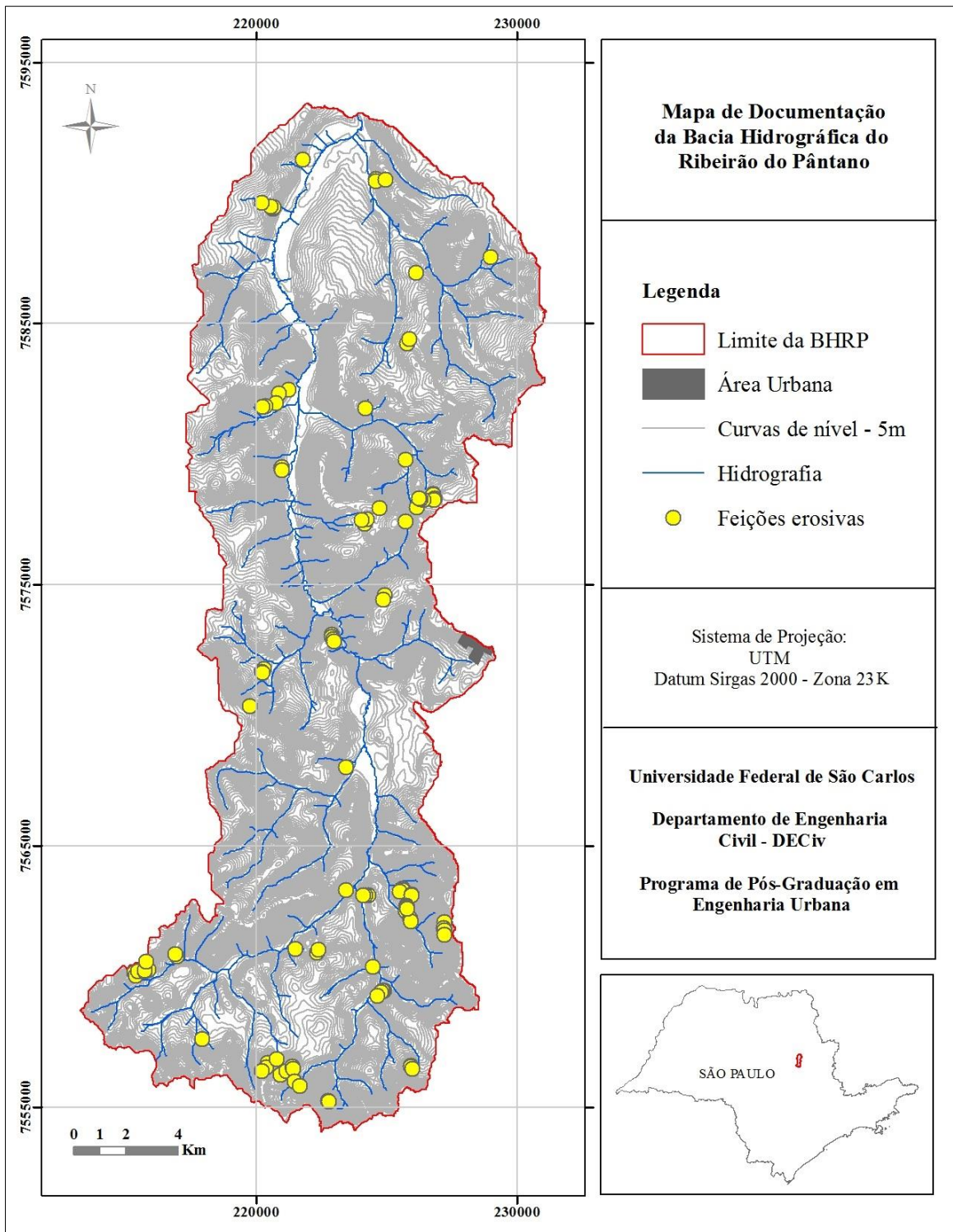


Figura 17 - Mapa de Documentação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano.

5.2 Processamento do MDE

5.2.1 Tratamento inicial do MDE

A Figura 18 apresenta os Mapas Hipsométricos da BHRP, em que se utilizou como base o MDE do Alos/Palsar sem tratamento inicial, com o *Focal Statistics* de 5 pixels e com *Focal Statistics* de 10 pixels. A representação da hipsometria para evidenciar a diferença na aplicação da ferramenta se deu pelo fato de facilitar essa visualização, já que com a utilização das curvas de nível a visualização seria mais difícil, principalmente nas áreas de maior densidade das curvas.

Observando a imagem, pode-se verificar que a aplicação da ferramenta leva à suavização do modelo, sendo perceptível principalmente na transferência das classes de altitude, que se dá de forma mais sutil.

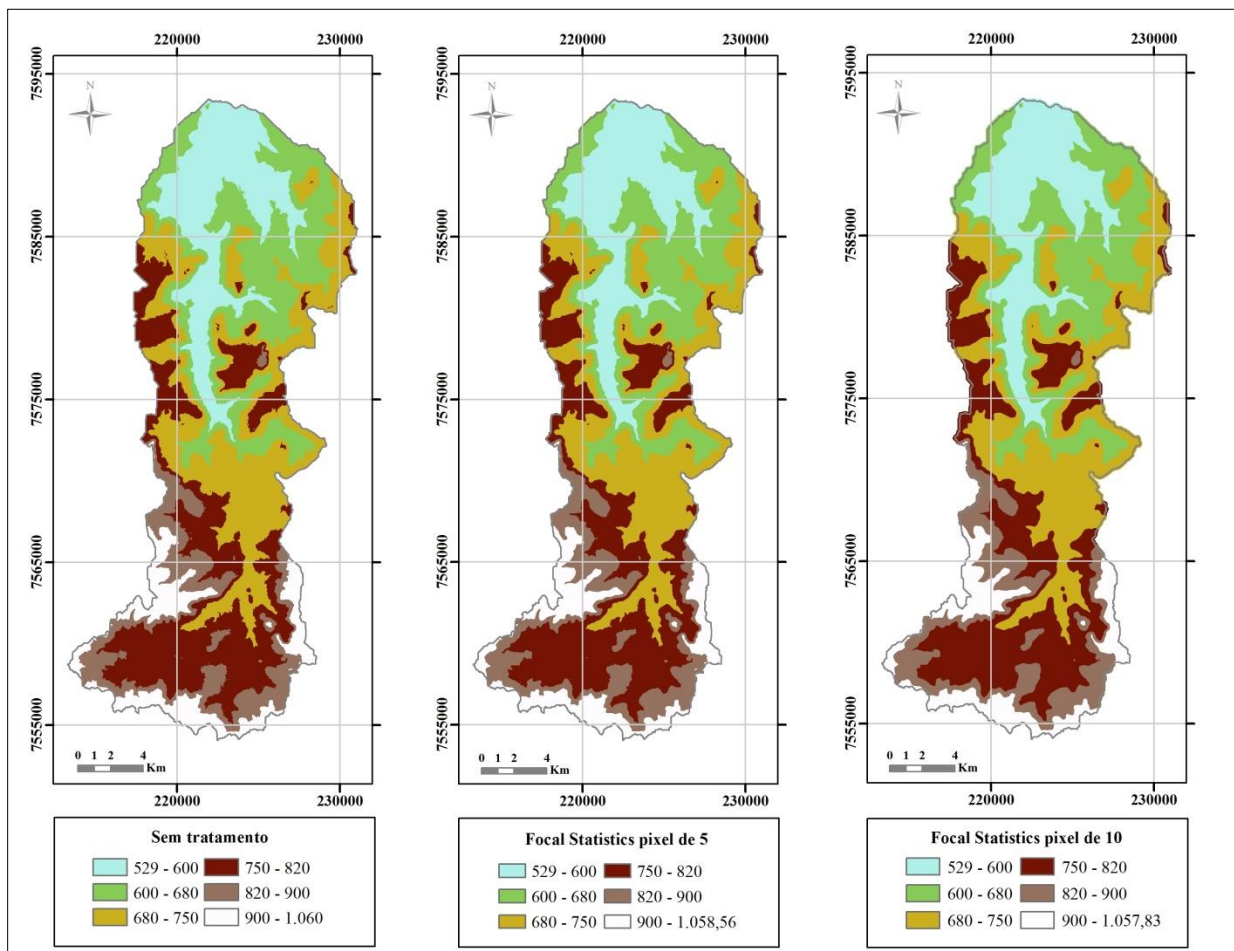


Figura 18 - Mapas Hipsométricos da BHRP em cada tratamento do MDE do Alos/Palsar.

Além da análise visual, numericamente os dados apresentam resultados consistentes com a realidade, quando se aplica a suavização ao MDE (Tabela 11). Os

valores da altitude mínima da área da BHRP continuaram iguais para os três casos (529m) e as altitudes médias e máximas variaram em torno de 2m. Tal fato sugere que a atenuação do modelo suaviza a representação do modelo, sem interferir de modo significativo nos valores de altitude.

Tabela 11 - Valores de altitude (m) da BHRP de acordo com o tratamento do MDE do Alos/Palsar.

	MDE sem tratamento	MDE com <i>Focal Statistics</i> de 5 pixels	MDE com <i>Focal Statistics</i> de 10 pixels
Altitude mínima	529	529	529
Altitude média	724,17	725,08	726,75
Altitude máxima	1060	1058,56	1057,83

O processamento foi realizado para o MDE obtido do radar Alos/Palsar e também para o da Carta Topográfica em algumas áreas da BHRP, tendo em vista que este último foi utilizado como forma de validação dos dados gerados com o MDE do radar, já que o uso da Carta é o método mais comum utilizado na literatura para a obtenção das áreas de contribuição.

Os resultados foram observados para 57 dos 100 pontos de cabeceiras levantados, e a Figura 19 apresenta o comportamento de quatro deles, o qual foi compatível com todos os 57. A escolha dos pontos observados é apresentada no item 5.3. Ressalta-se que na Figura 19 as erosões foram identificadas como 1, 2, 3 e 4, referentes aos números 1, 8, 12 e 15 respectivamente, da Tabela de caracterização das erosões em Anexo.

A análise foi realizada observando dois parâmetros: curva de nível e área de contribuição, buscando o tratamento com o melhor ajuste em relação a morfologia local.

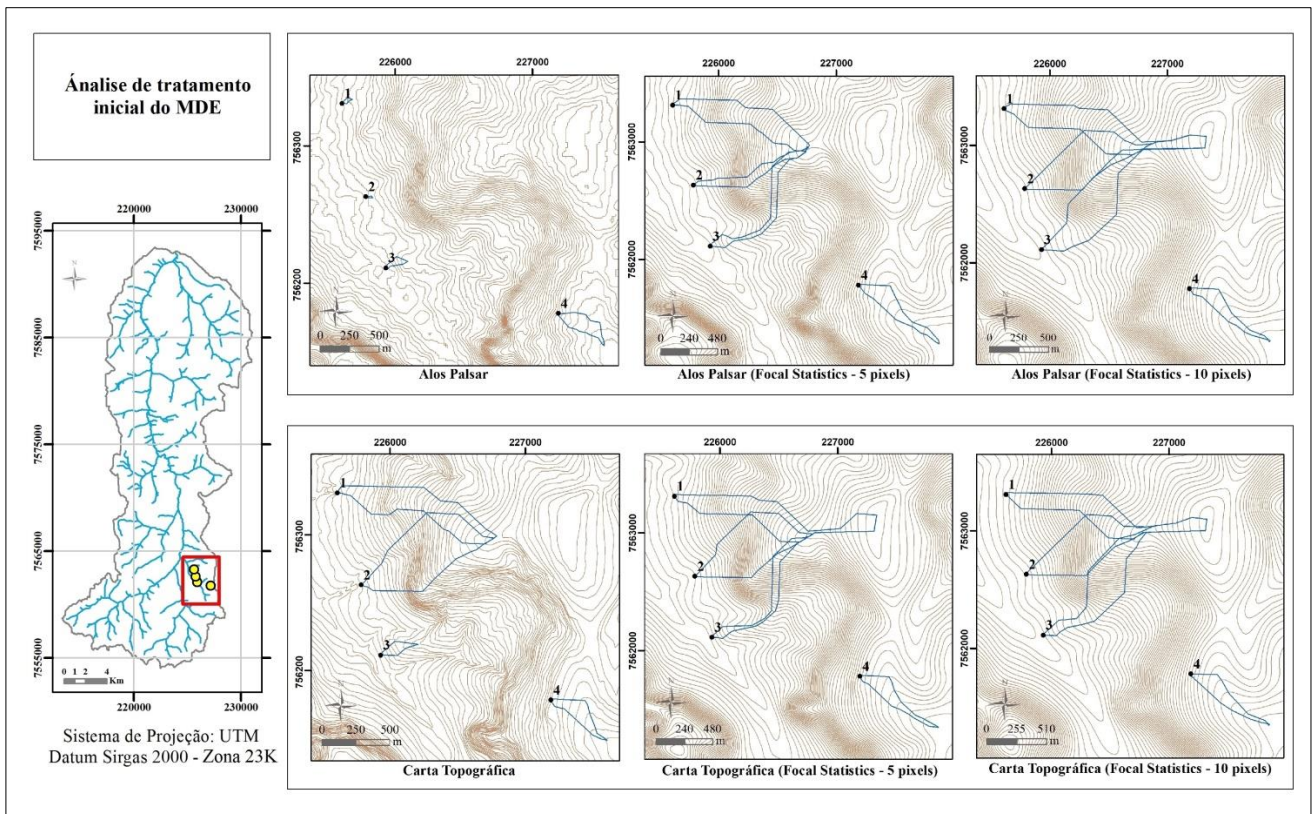


Figura 19 - Análise de tratamento inicial dos MDE provenientes do radar Alos/Palsar e da Carta Topográfica.

Assim, observa-se que, as áreas de contribuição obtidas a partir do MDE do Alos/Palsar sem qualquer tratamento, resultam muito pequenas e não representam corretamente a área de captação. Já com o uso da ferramenta *Focal Statistics*, as áreas foram se adequando à tendência natural do relevo, iniciando-se próximas aos topos de morro. Ainda sobre tal base de dados, o tratamento com o *Focal* de 5 pixels não foi suficiente para a área de contribuição atingir o topo de morro, exigindo uma suavização maior do relevo.

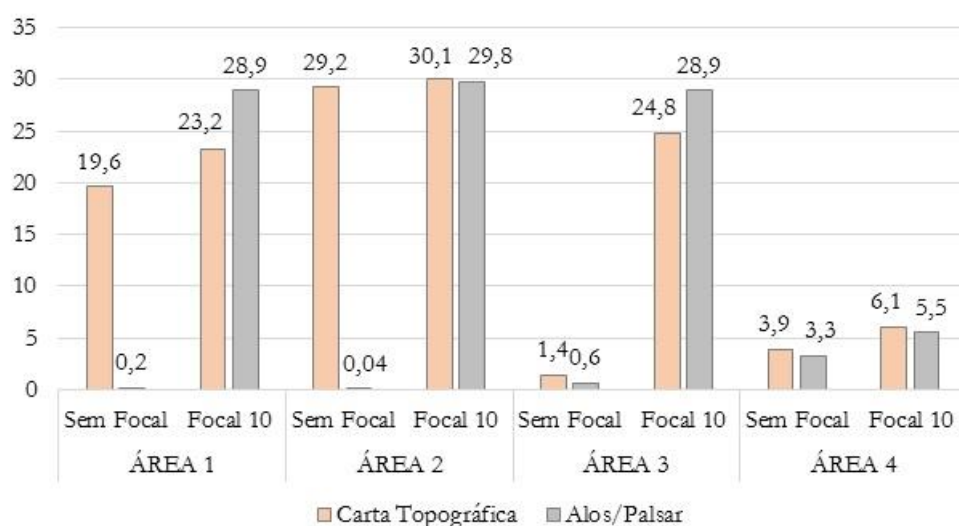
Além das áreas de contribuição, nota-se também a necessidade de suavização para o resultado das curvas de nível, visto a presença de saliências naquelas geradas sem o tratamento, o que induz às áreas não condizentes com a morfologia local. Conforme se aplica a ferramenta, as curvas se tornam mais suaves e realistas.

Na sequência, ao gerar os parâmetros curva de nível e área de contribuição a partir do MDE da Carta Topográfica, os resultados do Alos/Palsar se mostraram bem ajustados. Pode-se afirmar, assim, que o tratamento com a ferramenta *Focal Statistics* de 10 pixels gerou áreas mais condizentes com a realidade para ambos os MDEs, visto as áreas geradas sem tratamento não atingirem o topo de morro nos dois casos.

Niipele e Chen (2019) também discutiram que os erros no MDE podem ser tanto de fatores naturais (depressões e vegetação) ou do método de obtenção, os quais foram eliminados pelo recondicionamento do MDE, com a eliminação de possíveis depressões existentes (com métodos de preenchimento); além da suavização do modelo, a fim de preservar a morfologia predominante do relevo (estatística focal). Assim, concluíram que, com as devidas correções, o produto se apresentou muito eficiente para a extração da drenagem.

Além da análise visual, também foram analisados os valores calculados, em hectares, das áreas de contribuição sem e com o melhor tratamento identificado, comprovando a necessidade da eliminação dos ruídos presentes no MDE do Alos/Palsar (Tabela 12).

Tabela 12 - Áreas em hectares (ha) das áreas de contribuição.



Observa-se também a importância da aplicação do *Focal Statistics* no MDE oriundo da Carta Topográfica, já que os valores das áreas geradas com a Carta e com o Alos/Palsar, dentro do mesmo tratamento, se apresentaram muito semelhantes. Outro destaque é para o fato de que, com a aplicação da estatística focal, os valores para as áreas de contribuição obtidos a partir das duas fontes tendem a ficarem mais próximos devido à homogeneização dos valores dos modelos.

5.2.2 Carta de Declividade

Tendo em vista o objetivo desta pesquisa em avaliar o uso do MDE do radar Alos/Palsar para a obtenção de parâmetros morfométricos, foram geradas cartas de declividade para as três condições de tratamentos do MDE, a fim de se observar o comportamento.

Na Figura 20 é possível observar que a aplicação da ferramenta de suavização elimina os ruídos existentes, deixando o resultado mais homogêneo, interferindo diretamente nos valores da declividade para as áreas de contribuição.

Conforme aumenta o raio da estatística focal, observou-se que a declividade média da BHRP diminui (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores de S média da BHRP de acordo com o tratamento do MDE do Alos/Palsar.

MDE do Alos/Palsar	S média
Sem tratamento inicial	11,33%
<i>Focal Statistics de 5 pixels</i>	10,03%
<i>Focal Statistics de 10 pixels</i>	8,82%

Tal fato se deve à questão da atenuação da altitude do MDE, pois o procedimento elimina alguns topos de morros e fundos de vales, deixando o local mais regular. A validação dessa suavização será apresentada com análises de correlação no tópico 5.3.

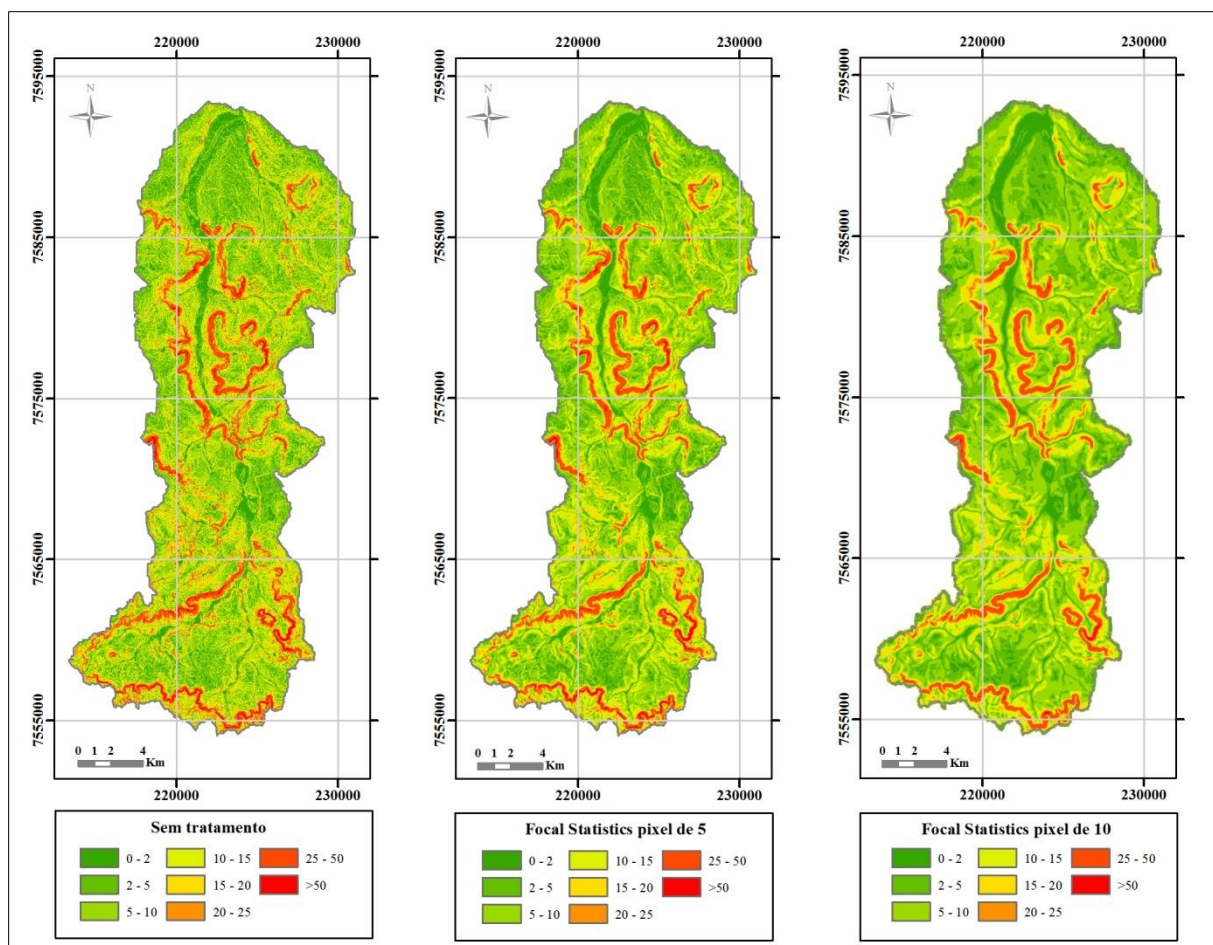


Figura 20 - Cartas de declividade a partir do MDE do radar Alos/Palsar.

5.2.3 Mapa de Fluxo Acumulado

Além da declividade, o outro fator utilizado no limiar topográfico é o fluxo acumulado, a partir do qual serão geradas as áreas de contribuição, já que esta informação representa as áreas de maiores concentrações de água dentro de uma bacia.

Observando as Figuras 21 e 22 se torna claro como a suavização do MDE proporciona melhora no aspecto hidrológico da bacia, em que o fluxo se apresenta com maior exatidão de acordo com as características físicas do local.

Assim, tal observação justifica o fato de as áreas de contribuição obtidas sem tratamento inicial e com a ferramenta *Focal* com *pixel 5* não condizerem com o relevo local, enquanto aquelas obtidas com o *Focal* de 10 se ajustarem à morfologia, atingindo os topos de morros.

Além disso, com o primeiro tratamento, notam-se *pixels* com valores nulos gerados nas proximidades da rede de drenagem, ou seja, nas regiões mais baixas do

relevo, onde se concentra o fluxo acumulado; o que se torna também suavizado no segundo tratamento.

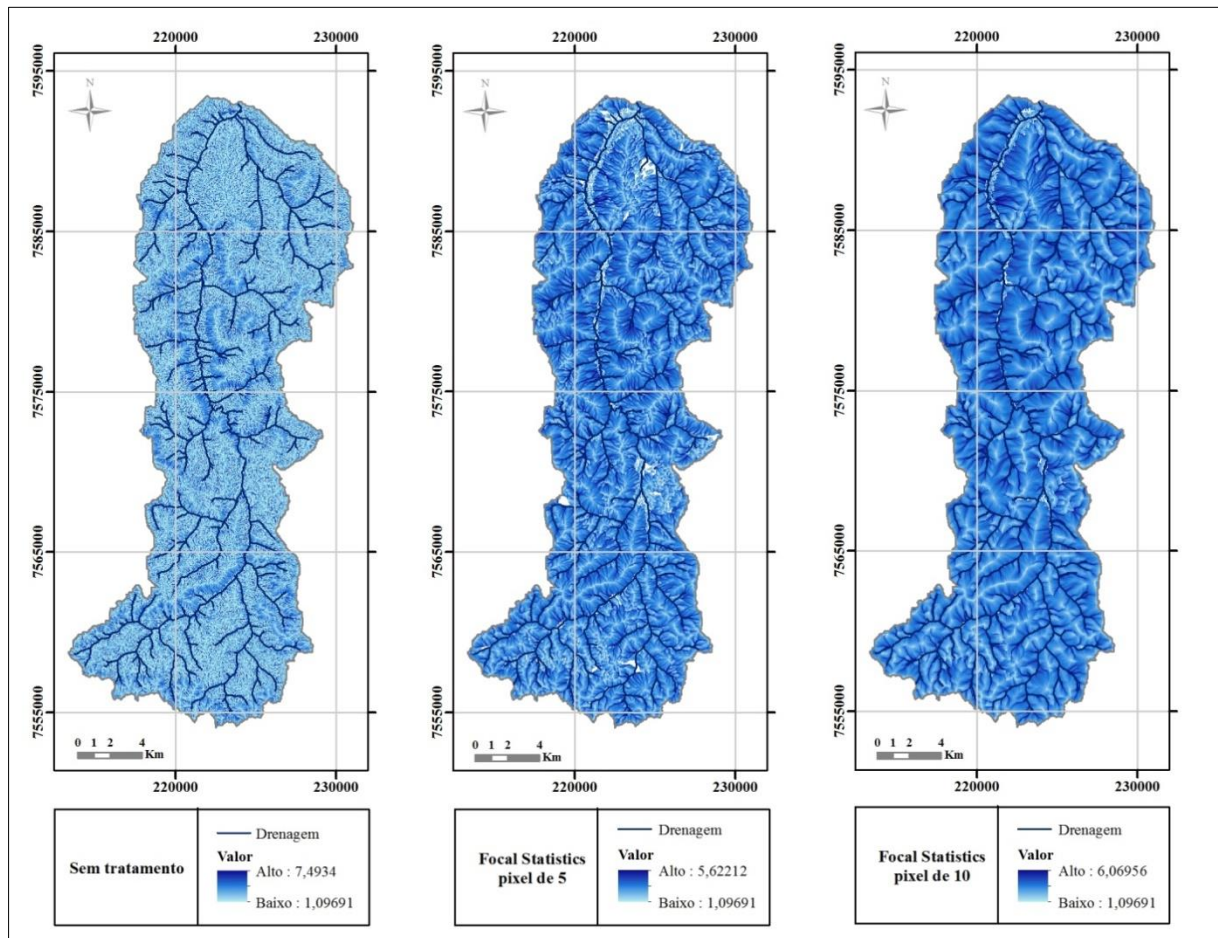


Figura 21 - Mapa de fluxo acumulado a partir do MDE do radar Alos/Palsar.

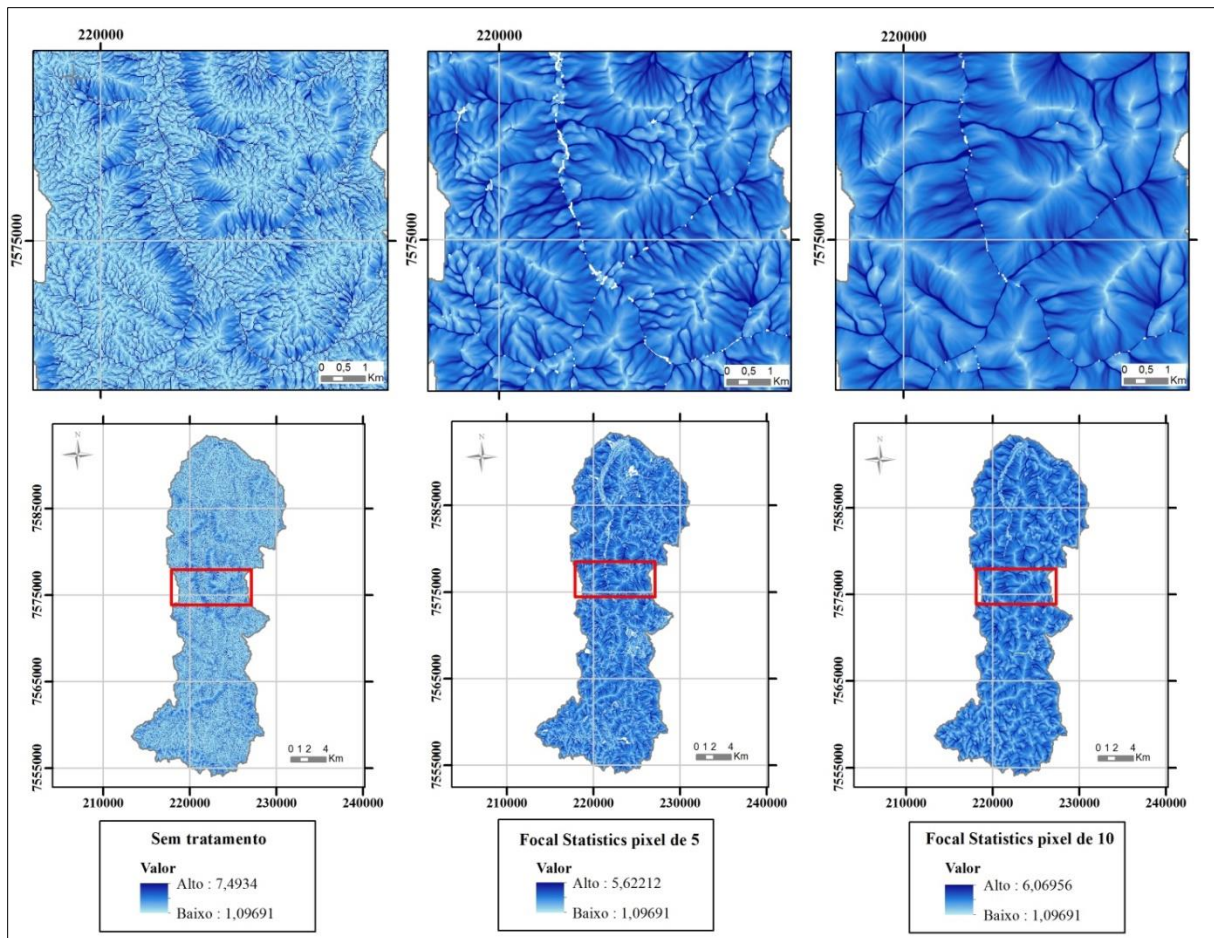


Figura 22 - Detalhes do fluxo acumulado com os tratamentos no MDE do radar Alos/Palsar.

5.3 Análise de Correlação

A fim de se comprovar se o tratamento mais adequado apontado no item anterior (*Focal Statistics* com *pixel* de 10) é compatível para todo o MDE da BHRP, foi realizada uma análise de correlação.

Os parâmetros analisados foram os resultados de A (ha) e S (%) obtidos com o MDE do radar e da Carta Topográfica, separados por tratamento: sem tratamento inicial, com *Focal Statistics* com *pixel* de 5 e *Focal Statistics* com *pixel* de 10.

A Figura 23 apresenta as áreas escolhidas para realizar a análise de correlação dos dados, em que a escolha se deu pela maior quantidade de pontos agrupados, além da abrangência dos mesmos em toda a bacia, garantindo condições de relevo distintas. Assim, o total de pontos foi de 57 cabeceiras de erosão.

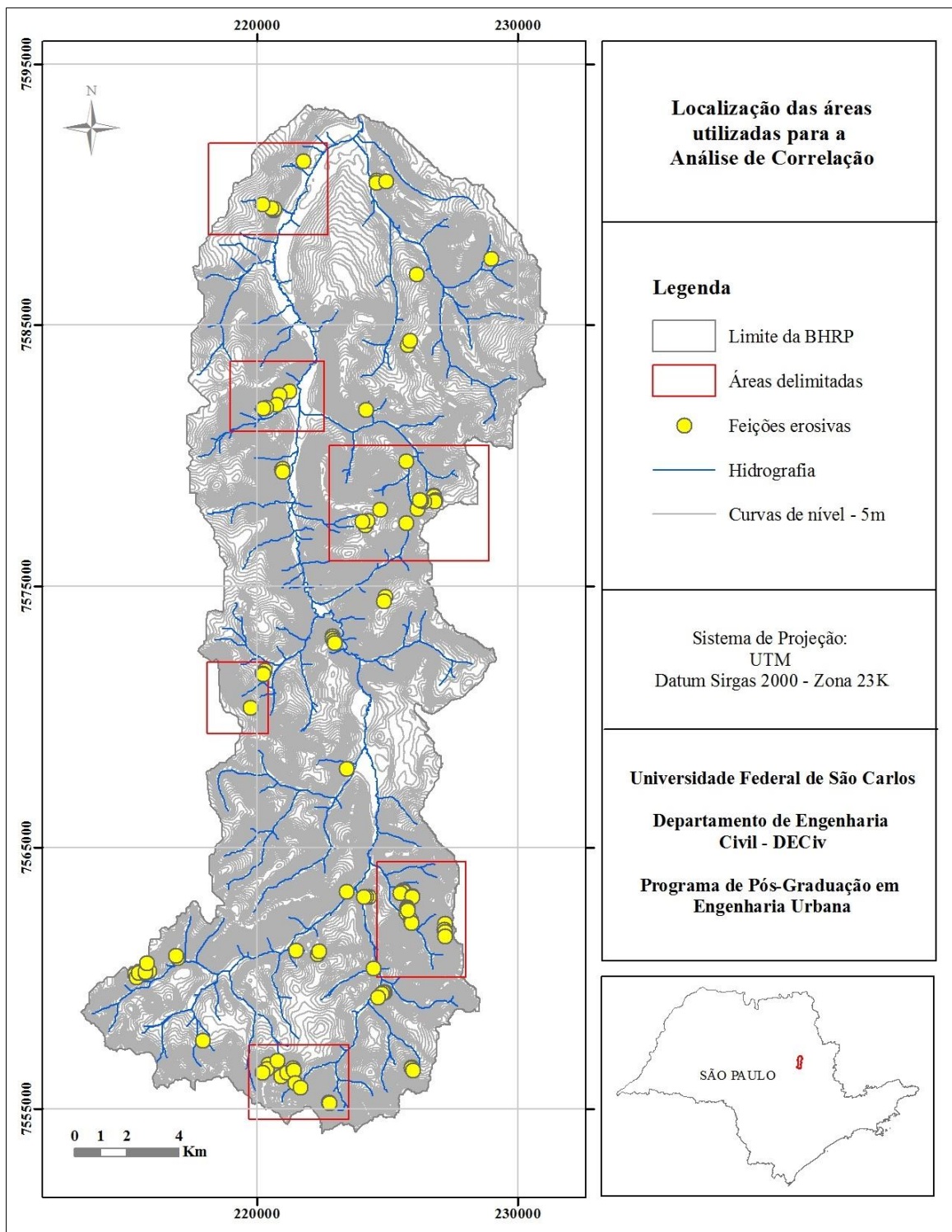


Figura 23 - Localização das áreas delimitadas para a análise de correlação.

5.3.1 Área de Contribuição

As áreas de contribuição foram calculadas em hectares (ha) e plotadas nos gráficos apresentados abaixo.

Observa-se que o valor do coeficiente obtido da correlação entre resultados para os 57 pontos sem tratamento inicial do MDE é praticamente zero, evidenciando que não há uma relação linear entre os dados (Figura 24).

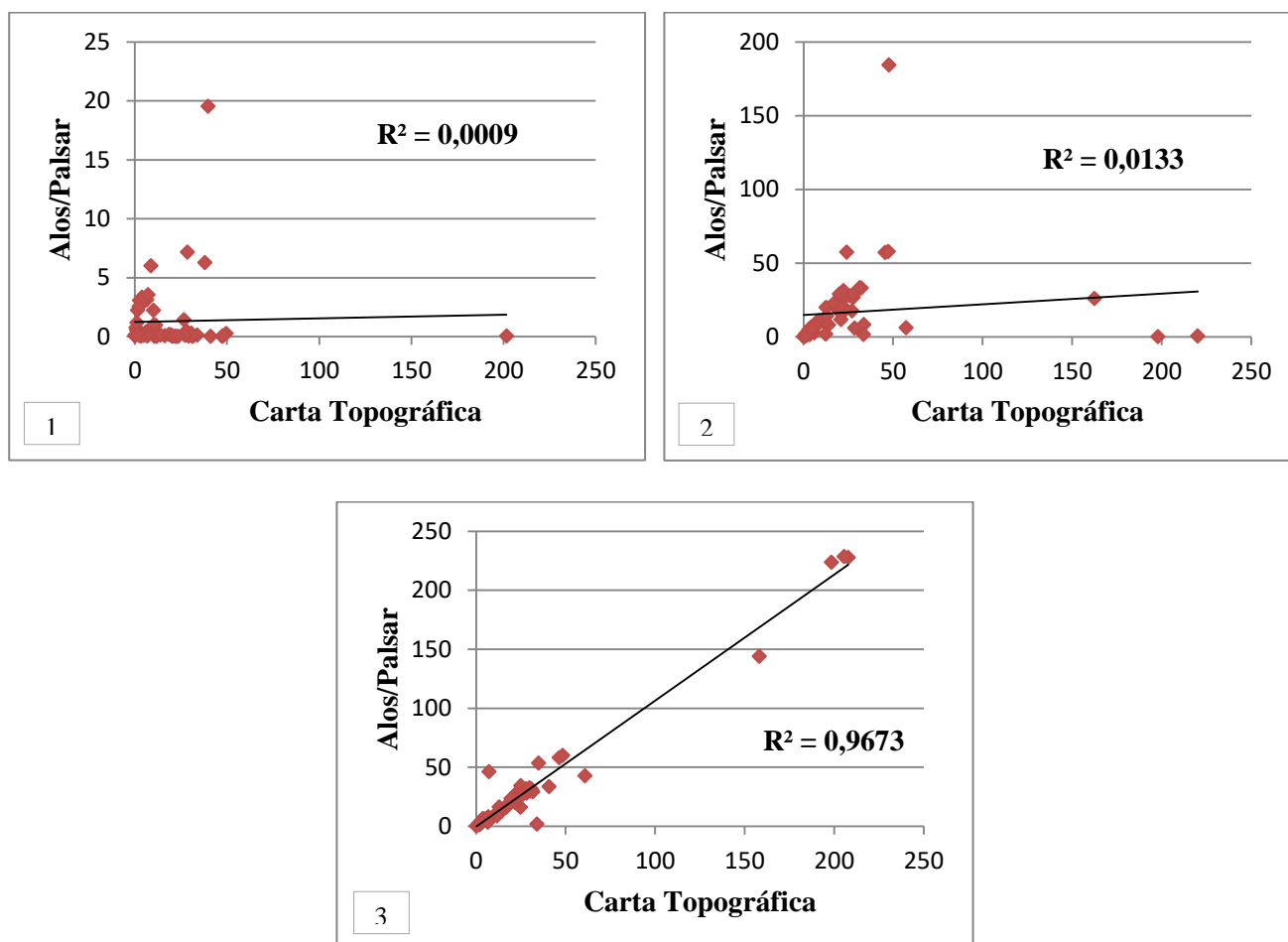


Figura 24 - Gráficos relacionando o parâmetro A (ha) de acordo com o tratamento do MDE:

- 1) sem tratamento inicial; 2) com tratamento utilizando o *Focal Statistics* de 5 pixels; 3) com tratamento utilizando o *Focal Statistics* de 10 pixels.

Ainda com o primeiro tratamento (*Focal Statistics* de 5 pixels), o resultado do coeficiente R^2 continua apresentando falta de relação entre os dados, necessitando ainda maior suavização. Já com o segundo tratamento (*Focal Statistics* de 10 pixels), o valor do coeficiente R^2 é quase um, evidenciando uma forte relação entre as variáveis.

Assim, com o resultado podem-se tirar duas conclusões: a primeira é que, para o conjunto de dados, este tratamento se mostrou satisfatório para ambas as bases de dados, podendo ser aplicado para toda a bacia; a segunda, é que o MDE do radar Alos/Palsar é um produto muito eficaz como substituto do MDE da Carta Topográfica, como base para a obtenção de parâmetros morfométricos, relacionados aos processos erosivos.

Além disso, ao comparar os resultados de ambos os dados com o mesmo tratamento, pode-se afirmar tanto a eficiência do dado de radar em captar a morfometria local, como a coerência da tendência do relevo entre 40 anos, já que a Carta Topográfica foi produzida no ano de 1970 e o MDE do radar é de 2010; gerando resultados com ótima correlação ($R^2 = 0,9673$).

5.3.2 Declividade

As declividades médias foram calculadas para cada área de contribuição, em porcentagem (%), e plotadas nos gráficos apresentados a seguir.

De acordo com a Figura 25, observa-se que o valor do coeficiente obtido da correlação para os 57 pontos sem tratamento inicial do MDE foi baixo, evidenciando novamente que não há uma relação linear entre os dados.

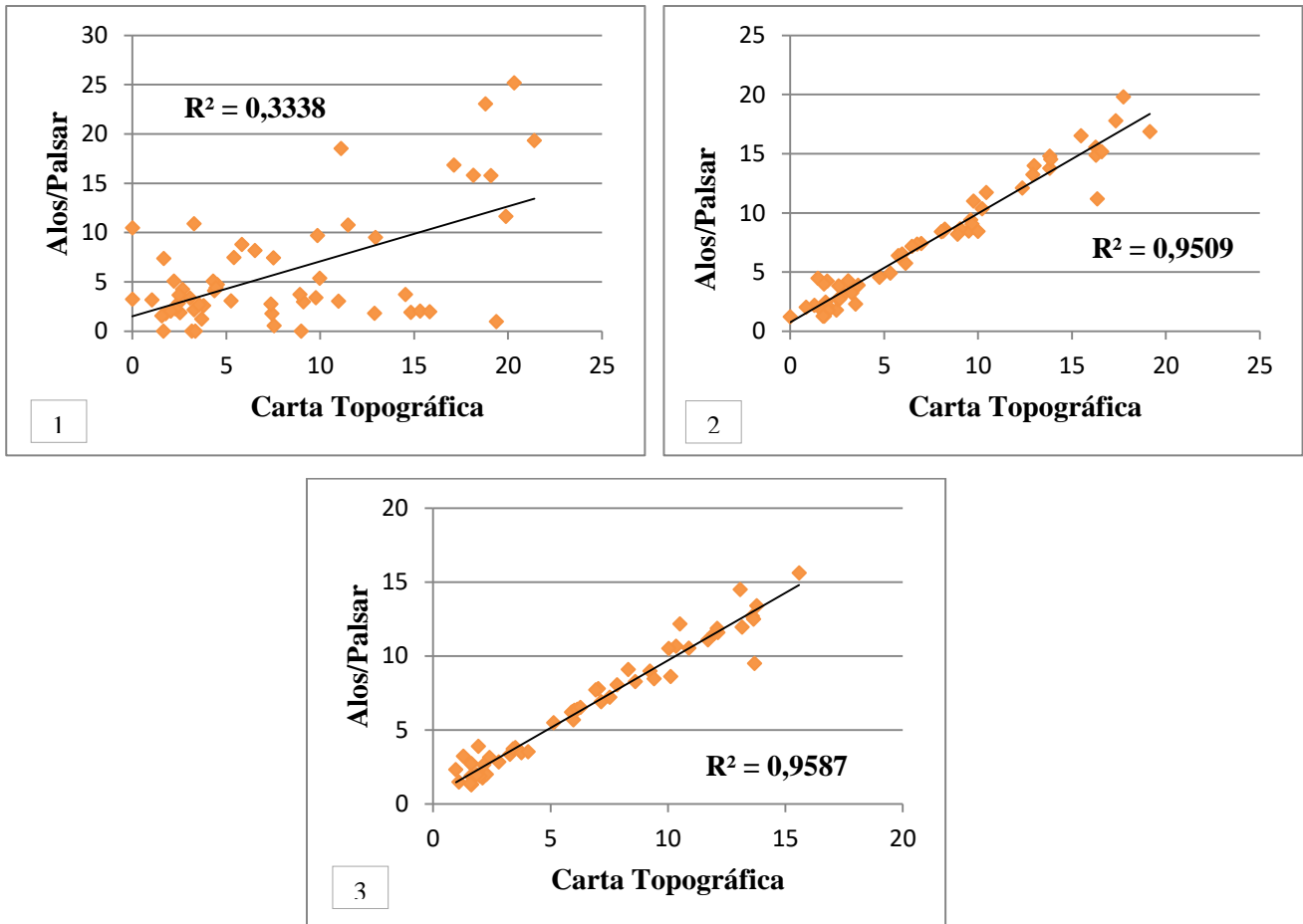


Figura 25 - Gráficos relacionando o parâmetro S (%) de acordo com o tratamento do MDE: 1) sem tratamento inicial; 2) com tratamento utilizando o Focal Statistics de 5 *pixels*; 3) com tratamento utilizando o Focal Statistics de 10 *pixels*.

Diferentemente do resultado para a área de contribuição, com o primeiro tratamento (*Focal Statistics* de 5 *pixels*), o resultado do coeficiente R^2 para a declividade média já se mostrou próximo de um, apresentando boa correlação entre as variáveis. Com o segundo tratamento (*Focal Statistics* de 10 *pixels*), o valor do coeficiente R^2 é ainda melhor, evidenciando também uma forte relação entre as variáveis.

Assim, novamente pode-se afirmar que o este tratamento foi positivo para ambas as bases de dados, além de o MDE do radar Alos/Palsar ser eficaz como base para a obtenção dos parâmetros morfométricos.

Analisando a diferença apresentada nos resultados entre os parâmetros morfométricos, de acordo com valor do raio utilizado na ferramenta *Focal*, conclui-se que o fluxo acumulado (base utilizada para gerar as áreas de contribuição) necessita de maior suavização (Tabela 14).

Isto ocorre, pois o raster do fluxo representa a somatória de todos os *pixels* que fluem da jusante para a foz, e por isso tende a acumular os erros também; mostrando-se mais sensível aos erros do radar, do que o raster da declividade.

Assim, para a elaboração do índice SxA, foi adotado o tratamento no MDE com o *Focal* de 10 *pixels*, visto que ambos os parâmetros se mostraram com boa correlação.

Tabela 14 - Valores de R² da correlação Carta Topográfica x Alos/Palsar para os parâmetros.

	MDE sem tratamento	MDE com <i>Focal Statistics</i> de 5 <i>pixels</i>	MDE com <i>Focal Statistics</i> de 10 <i>pixels</i>
A (ha)	0,0009	0,0133	0,9673
S (%)	0,3338	0,9509	0,9587

5.4 Índice SxA

Considerando o tamanho da área de estudo (392 km²) e, conseqüentemente, a heterogeneidade em relação a diversas características (uso do solo, formações geológicas, condições do relevo e fluxo hidrológico), buscou-se análises que agrupassem aspectos semelhantes. Tais análises se fizeram necessárias, tendo em vista a metodologia utilizada considerar apenas dois fatores (A e S), ideal para locais com os mesmos atributos; além de as características do meio físico refletirem nos coeficientes *a* e *b*.

Assim, o índice SxA foi aplicado em duas sub-bacias dentro da BHRP, em que se pôde observar maior concentração de processos erosivos dentro da mesma formação geológica (Figura 26). A sub-bacia 1, localizada ao norte da BHRP, apresenta área de 27 km², sendo identificadas 10 cabeceiras de erosão na formação Piramboia. Já a sub-bacia 2, localiza-se ao sul da bacia, com área de 35 km², totalizando 11 cabeceiras de erosão na formação Piramboia.

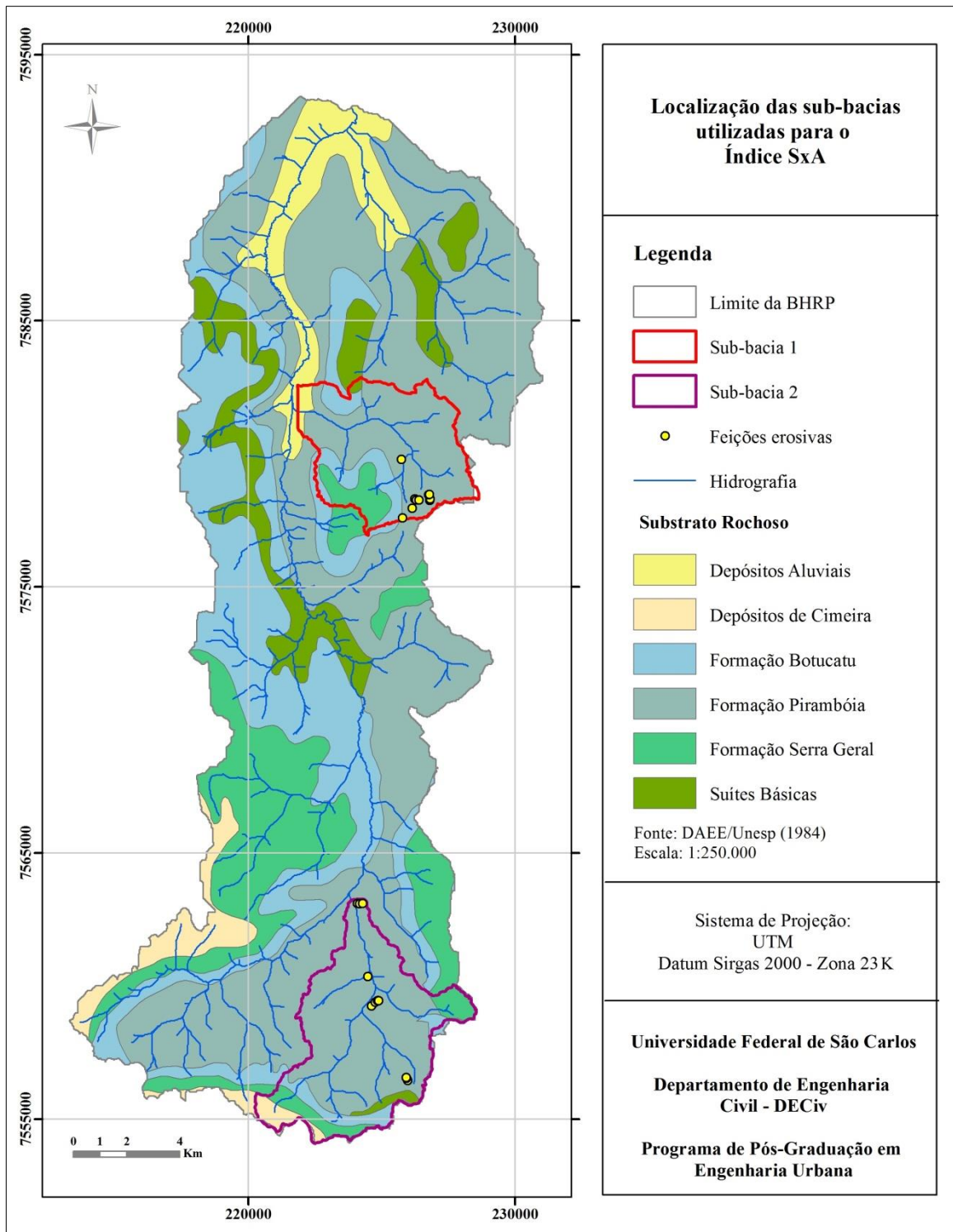


Figura 26 - Localização das sub-bacias delimitadas para a aplicação do índice SxA.

De acordo com o observado no item anterior, o MDE do radar Alos/Palsar com o tratamento com *Focal* de 10 *pixels* se mostrou eficaz para a obtenção dos parâmetros A e S. Assim, para a realização do índice SxA foi usada tal base de dados. Ressalta-se que o parâmetro A é apresentado em (ha) e S em (m/m), unidades adotadas pela metodologia do limiar topográfico.

A partir do gráfico plotado, o ajuste do limiar crítico foi realizado de forma manual, paralela à linha de regressão, com o objetivo de apontar os valores de A e S a partir dos quais, acima de tais valores, há a tendência do desencadeamento de processos erosivos dentro das sub-bacias.

Observa-se a linha de regressão obtida por meio da função potência (azul), além da linha inserida manualmente no limiar crítico (preta), além das equações em ambos os casos.

A alteração da equação representa o seu ajuste para o limiar crítico, ou seja, a declividade mínima a qual a partir desse valor o local se torna propício ao desenvolvimento de erosões. Ao analisar a Figura 27, referente ao limiar da sub-bacia 1, pode-se concluir que, com base na equação apresentada, para uma área de contribuição de 1 ha, a declividade crítica é de 3,71% (0,0371 m/m).

Quanto ao R^2 da linha obtida com a função potência, o valor se apresenta baixo (0,1691). Isto ocorre quando existem outras variáveis relacionadas na formação dos processos erosivos, tais como profundidade do canal, propriedades do solo, usos do solo diferentes, entre outras.

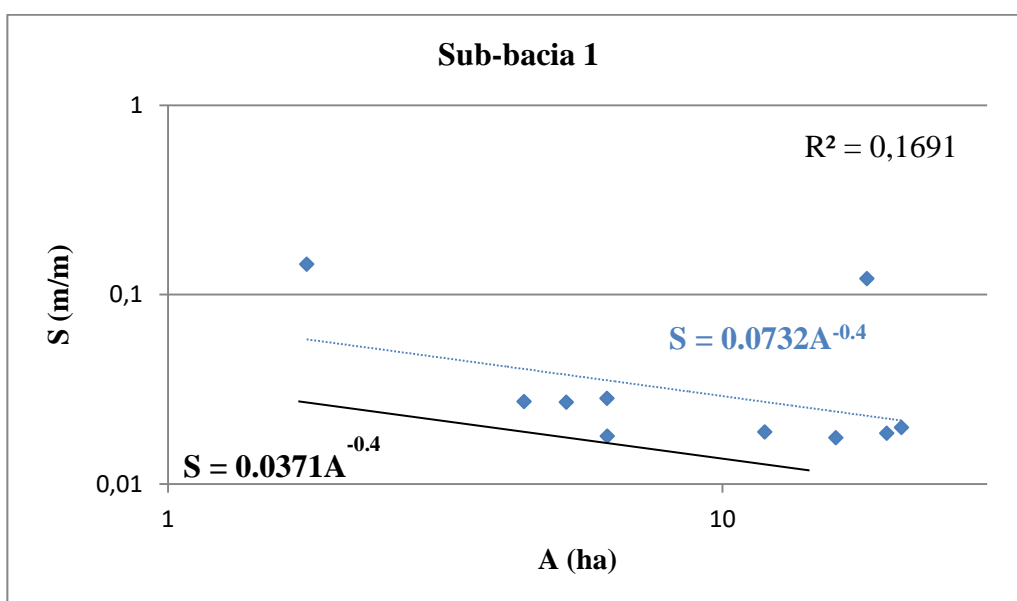


Figura 27 - Gráfico SxA para a Sub-bacia 1.

Para a sub-bacia 2, com base na equação, para uma área de contribuição de 1 ha, a declividade crítica é de 2,97% (0,0297 m/m) (Figura 28). Nas duas sub-bacias o valor obtido de S é baixo, pois os 21 pontos localizam-se em áreas de encosta, onde a declividade é naturalmente menor, além de os solos residuais da formação Piramboia serem predominantemente arenosos e pouco compactos, sendo, portanto, mais suscetíveis a processos erosivos.

Já o valor do R² se mostrou melhor para essa sub-bacia (0,6291), evidenciando correlação consistente entre as variáveis, ou seja, os parâmetros A e S exercem maior influência na formação dos processos, do que os atributos do meio físico.

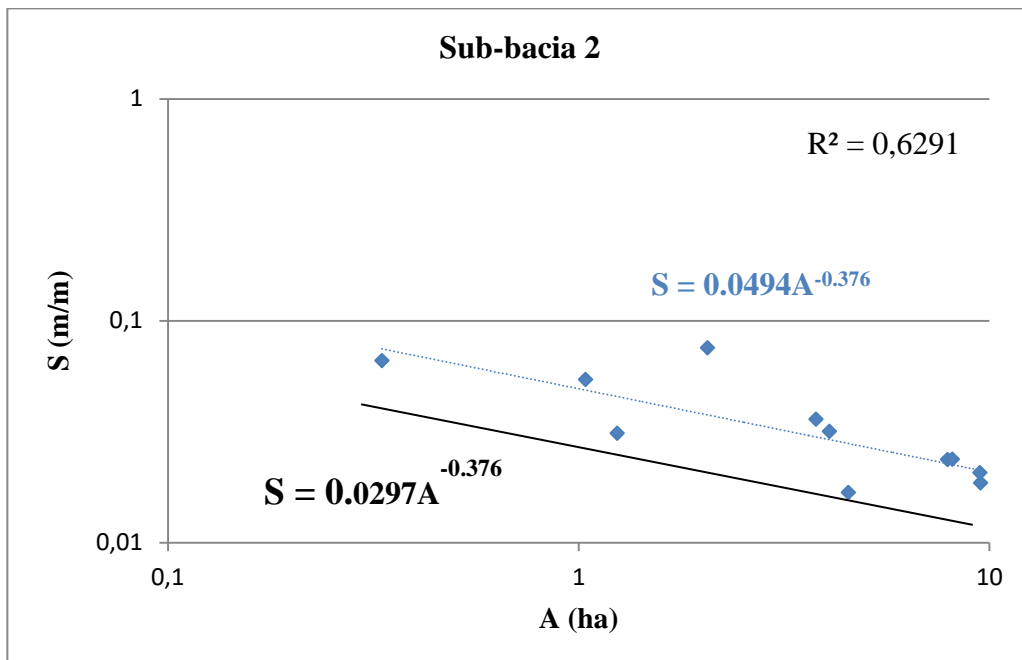


Figura 28 - Gráfico SxA para a Sub-bacia 2.

5.4.1 Análise comparativa com outros autores

A fim de validar os resultados obtidos, os valores de *a* e *b* dos índices das duas sub-bacias foram avaliados considerando os resultados dos trabalhos realizados por outros autores no Brasil. Como citado em Gómez-Gutiérrez et al. (2009), a constante *a* varia de acordo com a litologia, solo, clima e cobertura vegetal, e *b* é um expoente que se relaciona com o processo dominante na formação e desenvolvimento do canal.

Os dois trabalhos analisados localizam-se no município de São Pedro (SP) e apresentam características físicas muito semelhantes às da BHRP. O primeiro destaque é

a Formação Geológica, em que em ambas as análises também foram realizadas na Formação Piramboia; além de o manejo do solo também contar predominantemente com áreas de pastagem e culturas agrícolas, apenas com o adendo da área urbana em consolidação.

Como apresentado na Tabela 15, os resultados foram significativos. Araújo (2011) pontuou 21 cabeceiras em canais profundos e 12 em rasos, considerando como profundos aqueles canais com profundidade superior à 1m. O autor apresentou os valores de *a* e *b* para a análise em canais profundos como 0.0219 e -0.376, respectivamente. Tais valores são praticamente iguais (sendo *b* exatamente igual) aos obtidos na presente pesquisa, para a sub-bacia 2. Além disso, o valor de *b* para os canais rasos é muito próximo do valor de *b* da sub-bacia 1 da BHRP.

Observando-se os valores obtidos por Neves (2017), cujo destaque foi a similaridade do índice para as erosões em encosta, se nota que o valor de *b* é praticamente o mesmo obtido para as erosões também em encosta da sub-bacia 1. A autora utilizou 35 pontos nessa característica, em que apontou o surgimento desses processos associado principalmente ao manejo agrícola inadequado.

Tabela 15 - Correlação dos coeficientes obtidos nesta pesquisa com os de outros autores.

Autores	Local	Característica	Índice	a	-b
Araújo (2011)	São Pedro	Canais rasos	$S = 0.0128A^{-0.443}$	0.0128	-0.443
		Canais profundos	$S = 0.0219A^{-0.376}$	0.0219	-0.376
Neves (2017)	São Pedro	Encosta	$S = 0.0539A^{-0.412}$	0.0539	-0.412
Presente pesquisa	BHRP	Encosta (sub-bacia 1)	$S = 0.0371A^{-0.4}$	0.0371	-0.4
		Encosta (sub-bacia 2)	$S = 0.0297A^{-0.376}$	0.0297	-0.376

Esta comparação mostrou boa relação dos resultados da presente pesquisa em comparação aos dois trabalhos já realizados, considerando serem locais com a mesma formação geológica e manejo do solo, o que aponta novamente a necessidade de se aplicar o índice em áreas que agrupam características físicas semelhantes.

Assim, partindo do objetivo de se obter os parâmetros morfométricos a partir de dados remotos gratuitos, tal análise mostra que o MDE do radar Alos/Palsar pode ser boa alternativa para tal fim, podendo ser adotado para a elaboração do índice SxA em outras áreas.

5.5 Panorama atual dos processos erosivos da BHRP

Ao analisar temporalmente os processos erosivos da BHRP, nos dias atuais a maioria deles não existe mais. Dentre os 100 pontos de cabeceiras levantados em 1988, em 2018 apenas 10 puderam ser observados, em condições já estabilizadas.

A Figura 29 apresenta quatro processos erosivos, nos quais se encontram as 10 cabeceiras identificadas, nos anos de 1988 e 2018; sendo duas delas formadas em área de drenagem, e duas em encosta.

A posição da cabeceira da erosão, em muitos casos, pode justificar a sua resistência. Apenas 15 dos 100 pontos se localizavam em áreas de drenagem, enquanto 85 deles estavam em áreas de encosta. Geralmente as erosões em drenagem apresentam características permanentes, cujo desencadeamento está relacionado às características morfométricas, sofrendo menos influência das intervenções antrópicas. Já as erosões em encosta, costumam ser efêmeras, estando principalmente associadas ao manejo do solo inadequado.

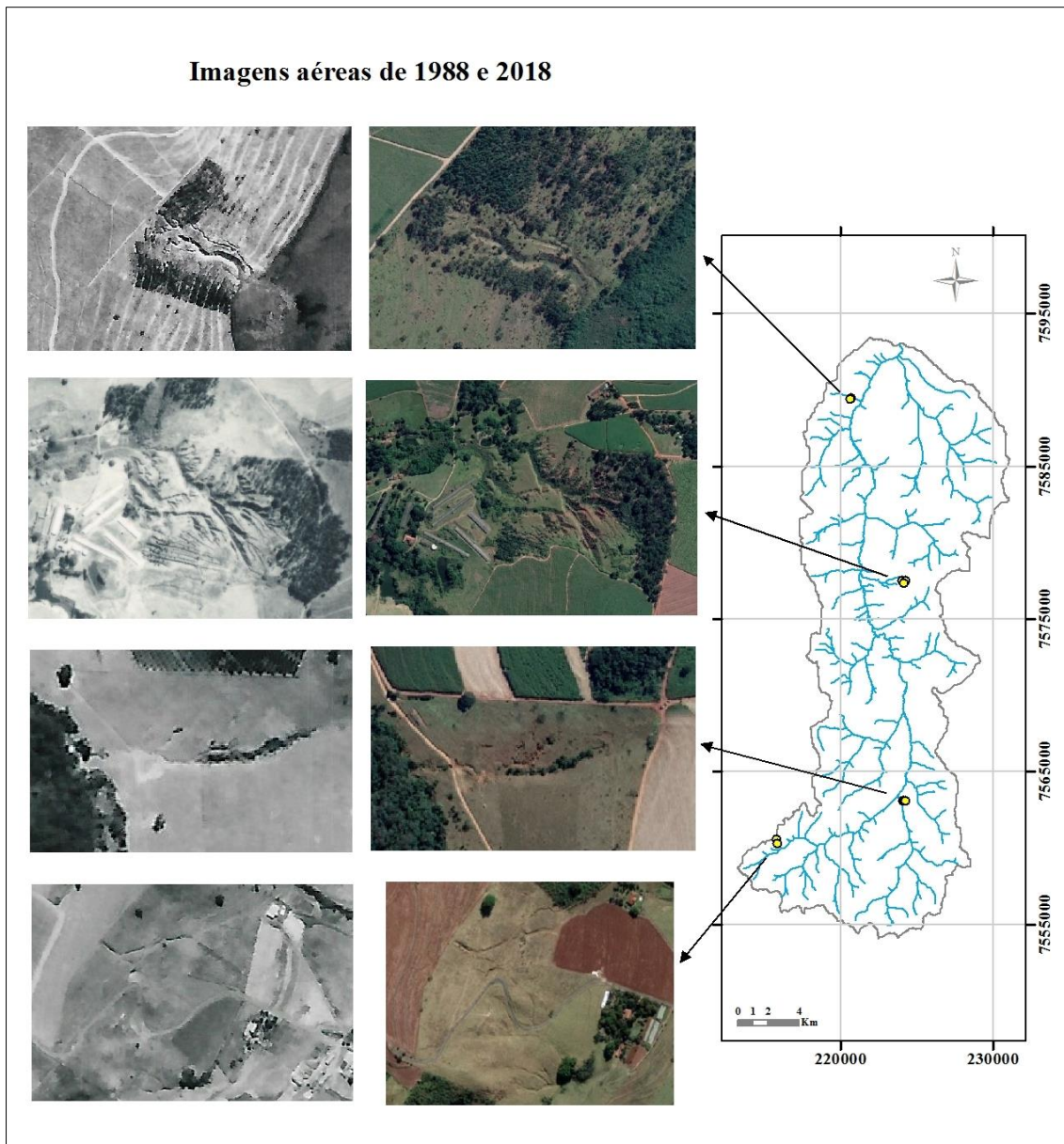


Figura 29 - Processos erosivos identificados em 1988 e ainda presentes em 2018.

Tal situação comprova que o fator decisivo na formação das erosões na BHRP é o uso do solo, já que a maioria das erosões pontuadas em 1988 era observada em pastagens, enquanto atualmente a bacia está predominantemente ocupada com cultura agrícola, com plantio de cana de açúcar. Pode-se observar que esta cultura e as técnicas de manejo a ela associadas mostram bom potencial de controle da degradação do solo, visto que hoje, em alguns locais, não se identifica nem mesmo as cicatrizes.

A Tabela 16 apresenta um resumo das principais alterações no uso do solo na BHRP, entre os anos de 1988 e 2018, ficando notório o grande avanço das culturas agrícolas, sejam elas anuais, semi perenes ou perenes.

Tabela 16 - Áreas em hectares (ha) das áreas de contribuição.

Uso do solo	1988 (%)	2018 (%)
Formação florestal (nativas e eucalipto)	21%	26%
Pastagem	55%	23%
Culturas agrícolas	21%	48%

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou como objetivo avaliar o uso do Modelo Digital de Elevação obtido do radar Alos/Palsar, para a obtenção dos limiares do relevo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano (SP), que levam à formação de processos erosivos lineares.

6.1 MDE do radar Alos/Palsar

Inicialmente foi identificado que o MDE proveniente do radar Alos/Palsar apresenta alguns ruídos, originados tanto pelo método de obtenção, como referentes a potenciais erros na identificação de objetos captados. Tais incongruências provocaram resultados das áreas de contribuição não condizentes com a realidade do relevo, havendo a necessidade de um tratamento inicial.

Para isso, foi utilizada a ferramenta *Focal Statistics*, do *software* ArcGIS 10.5, a qual calcula para cada *pixel* do raster uma estatística dos valores dentro de uma vizinhança especificada em torno dele. O processamento foi testado de duas formas, com o objetivo de identificar qual mais se adequava à morfologia do local: com a vizinhança para a estatística focal em formato de círculo, utilizando 5 *pixels* de raio, e a outra, com formato circular utilizando 10 *pixels*.

Além disso, os mesmos tratamentos foram aplicados para o MDE produzido com a Carta Topográfica do IGC (1970) em escala 1:10.000, em algumas áreas na BHRP, a fim de analisar se o MDE do radar pode ser utilizado como alternativa da carta, base de dados recorrente na metodologia do limiar topográfico.

Para as duas bases de dados, foram elaborados os parâmetros morfométricos área de contribuição (A) e declividade (S), considerando as três representações dos MDE: sem tratamento inicial, com o *Focal Statistics* de 5 *pixels* e com *Focal Statistics* de 10 *pixels*, os quais foram plotados em gráficos e calculados os coeficientes de determinação.

A análise de correlação entre os resultados obtidos utilizando a carta e o radar contou com 57 pontos de cabeceiras, dentre os 100 identificados em imagens aéreas de 1988. Observando os resultados de forma visual (formato das áreas de contribuição) e numérica (R^2), pôde-se verificar que o tratamento mais adequado para a BHRP foi o com maior suavização (*Focal Statistics* de 10 *pixels*), para os dois parâmetros morfométricos (A e S).

Ressalta-se que a suavização gera a atenuação do modelo sem interferir de modo significativo nos valores de altitude, visto que o valor da altitude mínima para os três tratamentos se manteve igual, alterando apenas em torno de 2m as altitudes média e máxima.

Além disso, pela análise de correlação, também se pôde concluir que o MDE do radar Alos/Palsar é um produto muito eficaz como substituto do MDE da Carta Topográfica, como base para a obtenção de parâmetros morfométricos relacionados aos processos erosivos. Esta conclusão é importante principalmente por promover maior facilidade nos estudos de limiar topográfico, os quais são escassos em nosso país. Com isso, podem auxiliar em áreas extensas, em que a digitalização das curvas de nível se torna mais custosa.

Cabe realçar que, na análise é fundamental o conhecimento prévio da área de estudo, principalmente da topografia, para facilitar a averiguação dos erros nas áreas de contribuição, além de alguma base que ofereça a identificação do relevo. Nesta pesquisa foi utilizado o *software Google Earth Pro*, que apresenta o terreno em 3D, auxiliando na observação se as áreas de contribuição estavam se adequando ao relevo.

Por fim, ao utilizar a ferramenta *Focal Statistics* é necessário analisar os diferentes resultados de acordo com o raio de suavização a ser trabalhado, para selecionar aquele mais condizente na representação dos parâmetros hidrológicos para o local de estudo.

6.2 Índice SxA

De acordo com os resultados da correlação, o MDE do radar Alos/Palsar com o tratamento com *Focal* de 10 *pixels* se mostrou eficaz para a obtenção dos parâmetros A e S, sendo esta base de dados utilizada para a realização do índice SxA.

O índice SxA foi aplicado em duas sub-bacias dentro da BHRP, em que se pôde observar maior concentração de processos erosivos dentro da mesma unidade geológica (Piramboia), visto que a classificação em condições físicas semelhantes leva ao melhor ajuste dos dados e permite uma compreensão mais detalhada dos mecanismos de

desencadeamento das erosões, podendo identificar, em alguns casos, outras variáveis associadas aos processos, como o uso do solo e posição da cabeceira.

Os índices obtidos foram $S = 0.0371A^{-0.4}$ na sub-bacia 1, evidenciando que para uma área de contribuição de 1 ha, a declividade crítica é de 3,71% (0,0371 m/m); e $S = 0.0297A^{-0.376}$ na sub-bacia 2, em que, para a mesma área, a declividade crítica é de 2,97% (0,0297 m/m). O valor obtido de S é considerado baixo, pois os 21 pontos utilizados na análise localizam-se em áreas de encosta, além de a formação Piramboia ser constituída predominantemente por solos arenosos pouco compactos, sendo, portanto, mais suscetível aos processos erosivos.

A fim de realizar a validação dos resultados, buscaram-se os valores obtidos em outros estudos também no Brasil. A avaliação mostrou conformidade do limiar topográfico com outros trabalhos em locais com características semelhantes de geologia e uso do solo, visto que a maioria dos coeficientes a e b apresentaram-se muito similares. Alguns valores se mostraram distintos, o que evidencia a relação do limiar topográfico com as condições físicas do local, devendo ser realizado para cada região.

A análise do limiar topográfico é fundamental na compreensão da dinâmica da formação dos processos erosivos, podendo auxiliar as ações de planejamento, principalmente com a facilidade garantida pelo uso dos produtos de radar, tendo em vista a falta de dados disponíveis em nosso país.

6.3 Evolução dos processos erosivos na BHRP

A maioria dos processos erosivos mapeados em 1988 na BHRP (100 pontos de cabeceiras) atualmente não existe mais (apenas 10 cabeceiras identificadas). Tal acontecimento deve-se principalmente a dois fatores: uso do solo e posição das cabeceiras no relevo.

O manejo do solo apresentou grande alteração nos 30 anos analisados (1988-2018), visto que o uso predominante era pastagem, ocupando 55% da bacia, o qual foi praticamente substituído por culturas agrícolas, principalmente a cana de açúcar, que hoje totalizam 48% da BHRP.

A posição das cabeceiras das erosões também apresenta grande influência no processo de estabilização das mesmas, já que a maioria delas (85 dos 100 pontos) se localizava em áreas de encosta, cuja característica de formação está associada principalmente ao manejo do solo, sendo mais fácil a recuperação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. E. S. Mapeamento geotécnico para gestão municipal – abordagem combinando três métodos distintos e sua aplicação em Analândia (SP). 2007. 217 p. **Dissertação**, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

AGUIAR, R. L. Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos – SP: Contribuição ao planejamento. 1989. 127 p. **Dissertação**, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

ALASKA SATELLITE FACILITY. Download Alos/Palsar. Disponível em: <<https://search.asf.alaska.edu/#/>>. Acesso em: jan, 2019.

ALMEIDA FILHO, G. S.; GAMA JUNIOR, G. F. C. Processos erosivos hídricos lineares dos tipos ravina e boçoroca. **16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, p. 1-8, 2018.

ARAUJO, T. P. 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.

ARAUJO, T. P.; PEJON, O. J. Topographical Threshold for Predicting Gully Erosion in the Tropical Region of São Pedro, SP, Brazil. **Electronic, Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, p. 10043-10059, 2015.

BARBOSA, Y. B. Estudo da vulnerabilidade a erosão da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano (São Carlos, Analândia e Descalvado – SP), utilizando Geoprocessamento. 2010. 148 p. **Dissertação**, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

BARBOSA, Y. B.; LORANDI, L. Estudo da Vulnerabilidade da Bacia do Ribeirão do Pântano: ênfase ao tema dimensão interfluvial. In: II Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá-PR. **Anais do II SIMPGEU**. Maringá - PR: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2009a. v. 1. p. 1-10.

BARBOSA, Y. B.; LORANDI, L. Estudo da Vulnerabilidade da Bacia do Ribeirão do Pântano: ênfase ao tema geologia. In: Congresso de Meio ambiente da AUGM, 2009, São Carlos - SP. **Anais do VI Congresso de Meio ambiente da AUGM**. São Carlos - SP: EDUFSCar, 2009b. v. 1. p. 1-15.

BARBOSA, Y. B.; LORANDI, L. Geoprocessamento aplicado ao Estudo da Vulnerabilidade à erosão na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano nos municípios de São Carlos, Analândia e Descalvado (SP). **Revista Geografia** (Londrina), v. 21, n. 1, p. 103-123, 2012.

BARROW, C. J. River Basin Development Planning and Management: A Critical Review. **World Development**, v. 26, n. 1, p. 171-186, 1998.

BASE. Aerofotogrametria e Projetos. Fotografias Aéreas. São Paulo: BASE, 1988. 14 Fotografias aéreas. Escala 1:40.000.

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.

BERNINI, T. A. Utilização de Imagens do ALOS/PALSAR no Mapeamento Digital de Atributos Físicos dos Solos. 2016. 123 p. **Tese**, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, J. **Conservação do solo**. 392 p. Piracicaba: Livrocercos, 1985.

BOARDMAN, J. The current on the South Downs: implications for the past. In: BELL, M.; BOARDMAN, J. **Past and Present Soil Erosion: archaeological and geographical perspectives**. Oxford: Oxbow Books, 1992, p. 9-20.

BOCCO, G. Gully erosion: processes and models. **Progress in Physical Geography**, v. 15, p. 392-406, 1991.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. & MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 237 p. São José dos Campos, 2001.

CASALÍ, J.; LÓPEZ, J. J.; GIRÁLDEZ, J. V. A process-based model for channel degradation: application to ephemeral gully erosion. **Catena**, v. 50, p. 435– 447, 2003.

CASTILLO, C.; TAGUAS, E. V.; ZARCO-TEJADA, P.; JAMES, M. R.; GÓMEZ, J. A. The normalized topographic method: an automated procedure for gully mapping using GIS. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, p. 2002–2015, 2014.

CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches. **Earth Science Reviews**, 2016.

CAVALCANTE, R. Apostila de Introdução ao SIG. Pró-Reitoria de Planejamento e Desenvolvimento Físico. Universidade Federal de Minas Gerais. 38 p. Belo Horizonte, 2015.

CHAVES, J. M.; SANO, E. E.; MENESES, P. R. Uso de imagens de radar como ferramenta auxiliar na identificação de elementos geológicos na região do cerrado. **Sitientibus**, n. 22, p. 55-69, 2000.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 4, n. 2, p. 69-100, 2003.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU (UGRHI 09). Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2018. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-MOGI/13745/rs_2018-ano-base-2017-da-ugri-09-vs_2-15-06-2018.pdf>. Acesso em: jan, 2019.

COSTA, C. W.; MOSCHINI, L. E.; LORANDI, R. Aquisição de dados geográficos em plataformas livres para estudos ambientais em bacias hidrográficas. In: MORAES, M. E.

B.; LORANDI, R. **Métodos e técnicas de pesquisa em Bacias Hidrográficas**. Ilhéus, BA: Editus, 2016, cap. 1, p. 15-33.

DAGGUPATI, P.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; SHESHUKOV, A. Y. Predicting ephemeral gully location and length using topographic index models. **Transactions of the ASABE**, v. 56, p. 1427-1440, 2013.

DAGGUPATI, P.; SHESHUKOV, A. Y.; DOUGLAS-MANKIN, K. R. Evaluating ephemeral gullies with a process-based topographic index model. **Catena**, v. 113, p. 177-186, 2014.

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. 191 p. **Dissertação**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DESCALVADO. Lei nº 1.600 de 04 de junho de 1996. Declara Área de Proteção Ambiental – APA. Disponível em: <<http://camaradescalvado.sp.gov.br>>. Acesso em: jan, 2019.

DEWITTE, O.; DAUODI, M.; BOSCO, C.; EECKHAUT, M. V. Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions. **Geomorphology**, v. 228, p. 101-115, 2015.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; MCKEAN, J. Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a Digital Terrain Model. **The Journal of Geology**, v. 101, n. 2, p. 259-278, 1993.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n.1, p. 175-181, 2006.

ELLISON, W. D. Soil Erosion by Rainstorms. **Science**, v. 111, p. 245-249, 1950.

EMBRAPA. Proposta de Criação e Caracterização da Área de Proteção Ambiental de Descalvado – SP, 1995. Disponível em: <<http://www.apadescalvado.cnpm.embrapa.br/index.html>>. Acesso em: jan, 2019.

EMBRAPA. Campinas: **Embrapa Monitoramento por Satélite**, 2013. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_alos.html>. Acesso em: out, 2018.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. About ArcGIS. Disponível em: <<http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis>>. Acesso em: abril, 2018.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. How Focal Statistics Works. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/how-focal-statistics-works.htm>>. Acesso em: maio, 2019.

FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. B. G. Análise ambiental por geoprocessamento em áreas com susceptibilidade à erosão do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG). **Caminhos de Geografia**, p. 50-65, 2003.

FERREIRA, R. V. Utilização de Sistemas de Informações Geográficas na Identificação de Unidades Geoambientais no Município de Analândia – SP. 2005. 120 p. **Dissertação**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá – Perímetro Corumbataí. Disponível em: <<http://fflorestal.sp.gov.br/juqueri-mirim-i/home/>>. Acesso em: jan, 2019.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. APA Piracicaba / Juqueri-Mirim ÁREA-I. Disponível em: <<http://fflorestal.sp.gov.br/perimetro-corumbatai/home>>. Acesso em: jan, 2019.

GEYMEN, A. Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, p. 827-837, 2012.

GHOSH, S.; GUCHHAIT, S. K. Geomorphic threshold estimation for gully erosion in the Lateritic Soil of Birbhum, West Bengal, India. Soil – **European Geosciences Union**, 2016.

GOLDMAN, S. J.; JACKSON, K.; BURSZTYNSKY, T. A. **Erosion & Sediment Control Handbook**. 454 p. New York: McGraw-Hill, 1986.

GOMES, L. B.; GELLI, G.; CARVALHO, M. J.; FORTES, L. P. S.; PITALUGA NETO, J.; COELHO, A. L.; OLIVEIRA, L. F.; BELLE-HAMER, N. Mapeando a Amazônia com o satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite). Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **INPE**, Florianópolis, p. 6759-6761, 2007.

GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; 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 Degradation & Development**, v. 20, p. 535–550, 2009.

GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; CONOSCENTI, C.; ANGILERI, S. E.; ROTIGLIANO, E.; SCHNABEL, S. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two Mediterranean basin: advantages and limitations. **Natural Hazards**, 2015.

GOVERS, G. Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. **Catena**, v. 18, p. 133-155, 1991.

GUDINO-ELIZONDO, N.; BIGGS, T. W.; BINGNER, R. L.; YUAN, Y.; LANGENDOEN, E. J.; TANIGUCHI, K. T.; KRETZSCHMAR, T.; TAGUAS, E. V.; LIDEN, D. Modelling Ephemeral Gully Erosion from Unpaved Urban Roads: Equifinality and Implications for Scenario Analysis. **Geosciences**, v. 8, p. 1-17, 2018a.

GUDINO-ELIZONDO, N.; BIGGS, T. W.; CASTILLO, C.; BINGNER, R. L.; LANGENDOEN, E. J.; TANIGUCHI, K. T.; KRETZSCHMAR, T.; YUAN, Y.; LIDEN,

D. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques. **Land Degradation & Development**, v. 29, p. 1896–1905, 2018b.

GURGEL, R. S.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CÂMARA, J. F. A.; ARAUJO SOBRINHO, D. A.; MARTINS, E. S.; BRAGA, A. R. S. Identificação das áreas vulneráveis à erosão a partir do emprego da EUPS – equação universal de perdas de solos no município de Riachão das Neves – BA. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 15, n.3, p. 93-112, 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama da cidade de Analândia. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/alandia/panorama>>. Acesso em: jan., 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama da cidade de Descalvado. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/descalvado/panorama>>. Acesso em: jan., 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama da cidade de São Carlos. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>. Acesso em: jan., 2020.

I.G.N. Erosion des terres agricoles d'après photographies aériennes; Ligescourt-Somme, 23 p, 1983.

IMWANGANA, F. M.; DEWITTE, O.; NTOMBI, M.; MOEYERSONS, J. Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). **Geomorphology**, v. 217, p. 131 – 139, 2014.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Cadastramento de pontos de erosão e inundação no Estado de São Paulo, **Relatório Técnico** nº 131.057-205, v. 2, 2012.

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency. Earth Observation Research Center. ALOS-2 Project / PALSAR-2. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm>>. Acesso em: mai., 2020.

JEFFERSON, A. J.; MCGEE, R. W. Channel network extent in the context of historical land use, flow generation processes, and landscape evolution in the North Carolina Piedmont. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, p. 601–613, 2013.

JUNQUEIRA, C. A. R.; MOLINA JUNIOR, V. E.; LOSSARDO, L. F.; FELICIO, B. C.; MOREIRA JUNIOR, O.; FOSCHINI, R. C.; MENDES, R. M.; LORANDI, R. Identificação do potencial de contaminação de aquíferos livres por vinhaça na bacia do Ribeirão do Pântano, Descalvado (SP), Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 3, p. 507-518, 2009.

KATZ, H. A., MICHAEL DANIELS, J.; RYAN, S. Slope-are thresholds of road-induce gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. **Earth Surface Processes and Landforms**, 2013.

KNAPEN, A.; POESEN, J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 217–228, 2010.

LEITE, S. S. Análise ambiental da área do morro do Cuscuzeiro (Analândia, SP), como subsídio ao planejamento do ambiente local. 2002. 161 p. **Dissertação**, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

LOBATO, M. M.; PENHA, L. R.; SANTOS, S. B.; FERREIRA, W. M. A importância dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) para a cartografia tradicional. **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, p. 01-05. Recife (PE), UFPA/FGC, 2008.

MAKINECI, H. B.; KARABORK, H. Evaluation Digital Elevation Model generated by Synthetic Aperture Radar data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **XXIII ISPRS Congress**, Prague, Czech Republic, p. 12-19, 2016.

MAPBIOMAS. Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Disponível em: <<http://mapbiomas.org/>>. Acesso em: nov., 2019.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. **Catena**, v. 50, p. 293-308, 2003.

MARTINI, L. C. P. M.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; OLIVEIRA, M. A. T. Avaliação da Suscetibilidade a Processos Erosivos e Movimentos de Massa: Decisão Multicriterial Suportada em Sistemas de Informações Geográficas. **Geologia USP Série Científica**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 41-52, 2006.

MASSOLI, M. Geologia do Município de Santa Rita do Passa Quatro, SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 2 (2), p. 35-45, 1981.

MASSOLI, M. Geologia da Folha de Piraçununga, SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 4 (1/2), p. 25-51, 1983.

MAUGNARD, A.; VAN DYCK, S.; BIELDERS, C. L. Assessing the regional and temporal variability of the topographic threshold for ephemeral gully initiation using quantile regression in Wallonia (Belgium). **Geomorphology**, v. 206, p. 165-177, 2014a.

MAUGNARD, A.; CORDONNIER, H.; DEGRE, A.; DEMARCIN, P.; PINEUX, N.; BIELDERS, C. L. Uncertainty assessment of ephemeral gully identification, characteristics and topographic threshold when using aerial photographs in agricultural settings. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, p. 1319–1330, 2014b.

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.

MILLARES, A.; GULLIVER, Z.; POLO, M. J. Scale effects on the estimation of erosion thresholds through a distributed and physically-based hydrological model. **Geomorphology**, v. 153-154, p.115-126, 2012.

MONTGOMERY, D.; DIETRICH, W. Where do channels begin? **Nature**, v. 336, p. 232–234, 1988.

MONTGOMERY, D.; DIETRICH, W. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. In: Kirkby, M. J (Ed). **Process models and theoretical geomorphology**. Chichester: Wiley, p. 221-246, 1994.

MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. Diagnóstico socioeconômico dos municípios da bacia hidrográfica do ribeirão do Pântano. **Revista Estudos Geográficos**, v. 6, p. 129-152, 2008.

MORAES, M. E. B. ; LORANDI, R. . Análise do cultivo de cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pântano, SP (1972-2006) e suas implicações socioambientais.. In: Seminário Nacional Dinâmica Territorial e Desenvolvimento Socioambiental, 2008, Salvador. **Anais do 5o. Seminário Nacional Dinâmica Territorial e Desenvolvimento Socioambiental**. Salvador - BA: Universidade Católica de Salvador, 2008. v. 1. p. 1-10.

MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. ; CANCADO, C. J. . Identificação dos Elementos da Paisagem na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano (SP): subsídios à gestão ambiental. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte - MG. **Anais do VII Simpósio Nacional de Geomorfologia**. São Paulo - SP: Sociedade Brasileira de Geomorfologia, 2008. v. 1. p. 1-10.

MORAES, M.E.B.; LORANDI, R. Análise dos elementos da paisagem na bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano (SP) como subsídio ao zoneamento ambiental. **Geografia**, Rio Claro, v. 34, n. 3, p. 577-594, 2009.

MORAES, M.E.B.; LORANDI, R. Análise do processo de ocupação do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pântano (SP, Brasil). **Revista Estudos Geográficos**, v. 8, p. 34-47, 2010.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion & Conservation**. 2ª ed., 198 p. London: Longman Scientific & Technical, 1995.

MORGAN, R. P. C.; MNGOMEZULU, D. Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in the Middle Veld of Swaziland. **Catena**, v. 50, p. 401-414, 2003.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; STEEGEN, A.; TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; VANDEKERCKHOVE, L.; GOVERS, G. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. **Geomorphology**, v. 40, p. 237–252, 2001.

NEUMANN, E. **Introdução à Engenharia Civil**. 1ª ed., 352 p. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

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 p. **Dissertação**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

NIPELE, J. N.; CHEN, J. The usefulness of Alos-Palsar DEM data for drainage extraction in semi-arid environments in The Ilishana sub-basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 21, p. 57–67, 2019.

NYSSSEN, J.; POESEN, J.; MOEYERSONS, J.; LUYTEN, E.; VEYRET-PICOT, M.; DECKERS, J.; HAILE, M.; GOVERS, G. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the northern Ethiopian highlands. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 27, p. 1267–1283, 2002.

OLIVEIRA, M. P. P. Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções para estabilização de taludes na boçoroca do Córrego do Cravo – Nazareno/MG. 2015. 191 p. **Dissertação**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

OUCHI, K. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. **Remote Sensing**, v. 5, p. 716-807, 2013.

OOSTWOUDE WIJDENES, D. J.; POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; NACHTERGAELE, J.; BAERDEMAEKER, J. Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, Southeast Spain. **Earth Surface and Landforms**, v. 24, p. 585-603, 1999.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) - INPE**, p. 2506-2513. João Pessoa-PB, 2015.

PATTON, P. C.; SCHUM, S. A. Gully Erosion, Northwestern Colorado: A Threshold Phenomenon. **Geology**, p. 88-90, 1975.

PEREZ-JUNIOR, O. R.; GARAVELLO, J. C. Ictiofauna do Ribeirão do Pântano, afluente do Rio Mogi-Guaçu, Bacia do Alto Rio Paraná, São Paulo, Brasil. **Revista Iheringia**, Série Zoologia, Porto Alegre, v. 97, n. 3, p. 328-335, 2007.

PRADO, B. R. Análise dos dados Alos/Palsar (modo de imageamento FBD) para identificação dos tipos de cobertura da terra na região norte do estado do Mato Grosso. 2009. 175 p. **Dissertação**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

PEJON, O. J.; RODRIGUES, V. G. S.; ZUQUETTE, L. V. Impactos Ambientais sobre o Solo. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. cap. 14, p. 317-343.

PEREIRA, P.; FONSECA, C. Sistemas de Informação Geográfica como ferramenta em Ecologia. **Revista Captar**, v. 1, n.1, p.31-39, 2009.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. **Caderno de Geografia**, v. 25, n. 43, p. 116-14, 2015.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003.

POESEN, J. Challenges in gully erosion research. **Landform Analysis**, v. 17, p. 5-9, 2011.

POESEN J. W. A.; TORRI, D. B.; VANWALLEGHEM, T. Gully Erosion: Procedures to Adopt When Modelling Soil Erosion in Landscapes Affected by Gullyng. **Handbook of Erosion Modelling**, cap. 19, p. 360-386, 2011.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de Bacias Hidrográficas. **Revista Estudos Avançados**, v. 22, p. 43-60, 2008.

RICCOMINI, C. Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 18 (1/2), p. 41-48, 1997.

ROSS, J. L. S. *O Registro Cartográfico dos Fatos Geomórficos e a Questão da Taxonomia do Relevo*. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 6, p. 17-29, 1992.

ROSS, J.; MOROZ, I. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 10, p. 41-58, 1996.

ROSSI, M.; TORRI, D.; SANTI, E. Bias in topographic thresholds for gully heads. **Natural Hazards**, v. 79, p. 51-69, 2015.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Embrapa Solos**. 5 ed. Brasília, DF, 2018.

SCHUSSEL, Z.; NASCIMENTO NETO, P. Gestão por Bacias Hidrográficas: Do debate teórico à Gestão Municipal. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 3, p. 137-152, São Paulo, 2015.

STABILE, R. A. Limites críticos topográficos de feições erosivas lineares em Piratininga (SP). 2013. 103 p. **Dissertação**, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

STORANI, D. L. Geossistemas e fragilidade de terras na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu/SP. 2010. 104 p. **Dissertação**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SVORAY, T.; MARKOVITCH, H. Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1970-1984, 2009.

SVORAY, T.; MICHAÏLOV, E.; COHEN, A.; ROKAH, L.; STURM, A. Predicting gully initiation: comparing data mining techniques, analytical hierarchy processes and the topographic threshold. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 37, p. 607-619, 2012.

TANDEL, R. Y. Caracterização do Arenito Pirambóia da Fazenda São João em Analândia, SP, e sua utilização industrial. 1993. 91 p. **Dissertação**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

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.

TESFA, T. K.; TARBOTON, D. G.; WATSON, D. W.; Schreuders, K. A. T.; BAKER, M. E.; WALLACE, R. M. Extraction of hydrological proximity measures from DEMs using parallel processing. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, p. 1696-1709, 2011.

TOREZAN, F. E. Proposta metodológica para subsidiar a determinação do grau de impacto ambiental em empreendimentos minerários na região de Descalvado e Analândia. 2005. 149 p. **Tese**, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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.

VALENTIN, C.; POESEN, J. LI, YONG. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005.

VALERIANO, M. V. Topodata: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**, 75 p., 2008.

VANDAELE, K.; POESEN, J.; GOVERS, G.; VAN WESEMAEL, B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomorphology**, v. 16, p. 161-173, 1996.

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.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUDE 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.; OOSTWOUDE WIJDENES, D.; NACHTERGAELE, J.; KOSMAS, C.; ROXO, M. J.; FIGUEIREDO, T. Thresholds for gully initiation and

sedimentation in Mediterranean Europe. **Earth Surf. Process. Landforms**, 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.

VERACHTERT, E.; VAN DEN EECKHAUT, M.; POESEN, J.; DECKERS, J. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: a case study from central Belgium. **Geomorphology**, v. 118, p. 339-348, 2010.

VIANA, S. N. Análise de Imagens do Satélite ALOS PALSAR para Discriminar Fitofisionomias do Bioma Cerrado: Estudo de Caso no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. 2012. 77 p. **Dissertação**, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

VIEIRA, A. C. F. Controles morfológicos para a iniciação de canais em encostas naturais por fluxos superficiais: evidências de campo e modelagem. 2002. 94 p. **Dissertação**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

VRIELING, A.; RODRIGUES, S. C.; STERK, G. Evaluating erosion from space: a case study near Uberlândia. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, Special Issue, p. 683-696, 2005.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. 478 p. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.

ZOLEZZI, G.; BEZZI, M.; SPADA, D.; BOZZARELLI, E. Urban gully erosion in sub-saharan Africa: A case study from Uganda. **Land Degradation and Development**, v. 29, p. 849-859, 2018.

ANEXO

Caracterização das feições erosivas levantadas em imagens de 1988 na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano.

Nº	Coordenadas (Datum Sirgas 2000)			Posição no relevo	S.R.	Uso (1988)	Uso (2018)
	X	Y	Z				
1	225596	7563361	765	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
2	225613	7563308	767	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
3	225490	7563258	755	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
4	225956	7563139	816	Encosta	B.	Formação Florestal	Cultura Anual e Perene
5	225947	7563123	813	Encosta	B.	Formação Savânica	Cultura Anual e Perene
6	225758	7562703	761	Encosta	B.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
7	225772	7562654	760	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
8	225787	7562628	761	Encosta	B.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
9	225770	7562602	759	Encosta	B.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
10	225720	7562525	755	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
11	225890	7562217	754	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
12	225932	7562109	752	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
13	227194	7562075	937	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
14	227188	7561845	954	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
15	227189	7561779	957	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
16	224279	7563116	745	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
17	224168	7563097	731	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
18	224087	7563115	727	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
19	223443	7563324	729	Encosta	P.	Pastagem	Formação Florestal
20	224476	7560373	756	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
21	224881	7559459	784	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
22	224845	7559456	782	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
23	224765	7559409	779	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
24	224623	7559264	778	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
25	221510	7561050	746	Encosta	P.	Pastagem	Floresta Plantada
26	215346	7560153	846	Drenagem	S.G.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
27	215395	7560038	840	Drenagem	S.G.	Pastagem	Pastagem
28	215488	7560189	859	Encosta	S.G.	Pastagem	Formação Florestal
29	215876	7560270	852	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
30	224162	7577337	798	Drenagem	S.G.	Pastagem	Cultura Semi Perene
31	224227	7577521	795	Drenagem	S.G.	Formação Campestre	Formação Campestre
32	224042	7577500	780	Drenagem	S.G.	Pastagem	Pastagem
33	225707	7577418	742	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
34	224733	7577938	795	Encosta	S.G.	Cultura Anual e Perene	Cultura Semi Perene
35	226148	7577962	714	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
36	226782	7578475	702	Encosta	P.	Pastagem	Formação Campestre
37	226761	7578464	701	Encosta	P.	Pastagem	Formação Campestre
38	226819	7578308	710	Encosta	P.	Pastagem	Formação Campestre
39	226801	7578252	711	Encosta	P.	Pastagem	Formação Campestre
40	226397	7578267	698	Drenagem	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
41	226297	7578274	696	Drenagem	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
42	226236	7578305	695	Drenagem	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
43	225733	7579793	629	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
44	224186	7581764	642	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
45	221246	7582473	573	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
46	220856	7582338	609	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
47	220742	7581956	586	Encosta	P.	Pastagem	Pastagem
48	220347	7581851	606	Encosta	B.	Pastagem	Cultura Semi Perene

49	220247	7581832	612	Encosta	B.	Formação Campestre	Pastagem
50	220953	7579474	582	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
51	220980	7579508	579	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
52	220973	7579415	579	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
53	219757	7570370	824	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
54	224922	7574605	769	Encosta	P.	Cultura Anual e Perene	Cultura Semi Perene
55	224871	7574442	772	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
56	222883	7573103	688	Encosta	D.P.	Pastagem	Pastagem
57	222908	7573015	693	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
58	222940	7572938	676	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
59	222989	7572844	677	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
60	223443	7568016	715	Encosta	B.	Pastagem	Cultura Semi Perene
61	220291	7571793	690	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
62	220211	7571681	693	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
63	220203	7571659	694	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
64	220232	7571637	690	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
65	225783	7584238	654	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
66	225860	7584412	651	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
67	226118	7586967	605	Encosta	D.P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
68	228977	7587570	645	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
69	220648	7589420	577	Drenagem	P.	Pastagem	Pastagem
70	220672	7589473	575	Drenagem	P.	Pastagem	Pastagem
71	220560	7589502	583	Drenagem	P.	Pastagem	Pastagem
72	220208	7589645	600	Drenagem	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
73	221783	7591298	556	Encosta	D.A.	Pastagem	Pastagem
74	224578	7590553	554	Drenagem	D.A.	Pastagem	Cultura Semi Perene
75	224582	7590467	553	Encosta	D.A.	Pastagem	Cultura Semi Perene
76	224953	7590540	596	Encosta	D.A.	Pastagem	Cultura Semi Perene
77	222336	7560901	798	Encosta	P.	Pastagem	Formação Florestal
78	222369	7561026	789	Encosta	P.	Pastagem	Formação Florestal
79	220449	7556700	954	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
80	220386	7556536	975	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
81	220928	7556238	974	Encosta	S.G.	Pastagem	Floresta Plantada
82	221151	7556389	983	Encosta	B.	Pastagem	Floresta Plantada
83	221384	7556546	915	Encosta	B.	Pastagem	Formação Florestal
84	221404	7556468	895	Encosta	B.	Pastagem	Formação Florestal
85	221461	7555985	900	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
86	221663	7555810	864	Encosta	S.G.	Pastagem	Floresta Plantada
87	222746	7555250	896	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
88	222782	7555214	897	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
89	225919	7556577	887	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
90	225929	7556541	890	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
91	225975	7556461	889	Encosta	P.	Pastagem	Cultura Semi Perene
92	220225	7556393	988	Encosta	B.	Pastagem	Pastagem
93	227192	7561594	955	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
94	215737	7560207	866	Encosta	S.G.	Pastagem	Pastagem
95	215742	7560235	874	Encosta	S.G.	Pastagem	Formação Florestal
96	215780	7560584	902	Encosta	D.C.	Pastagem	Pastagem
97	216971	7560785	805	Encosta	S.G.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
98	216916	7560845	811	Encosta	S.G.	Pastagem	Cultura Anual e Perene
99	220790	7556840	845	Drenagem	B.	Pastagem	Pastagem
100	217920	7557610	817	Drenagem	P.	Pastagem	Pastagem

S.R. - Substrato Rochoso; B. - Botucatu; D.A. - Depósitos Aluviais; D.C. – Depósitos de Cimeira;

P. - Piramboia; S.B. - Suítes Básicas; S.G. - Serra Geral.