

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA E TEMPORAL DE
ÁREA DEGRADADA POR PROCESSOS EROSIVOS: O EXEMPLO
DA SUB-BACIA DO TUCUM, SÃO PEDRO, SP

Karyna D'Onofre Neves

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS MINERAIS E MEIO
AMBIENTE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SÃO PAULO

2017

Trilha para o desencanto da ilusão...

“Neste mundo não existe verdade universal. Uma mesma verdade pode apresentar diferentes fisionomias. Tudo depende das decifrações feitas através de nossos prismas intelectuais, filosóficos, culturais e religiosos. “
- Dalai Lama.

Resumo

Áreas degradadas por erosão são atualmente um dos maiores problemas de inutilização do terreno principalmente no estado de São Paulo, e muito ainda tem-se para estudar na área. A sub-bacia do Córrego do Tucum se trata de um local de grande interesse público por gerar muitos gastos e perdas tanto ambientais como sociais, e ainda apresenta diversos riscos.

Este projeto realizou uma análise histórica da geomorfometria da área de estudo, observando como a mesma se desenvolveu ao longo dos anos considerando as intervenções realizadas, utilizando de fotografias aéreas.

Com alguns dados do tipo modelos digitais do terreno como SRTM, TanDEM-X e pontos cotados foram elaborados alguns MDEs para a comparação da qualidade dos atributos gerados como hipsometria, declividade, aspecto e curvatura das vertentes além da qualidade visual para análise da imagem. Especificamente com a imagem do ano de 2014 foi realizada uma análise da qualidade dos MDEs comparando-os também com pontos gerados pelo QGIS, para comparação principalmente com os pontos cotados e imagem TanDEM-X e estimar qual é a melhor imagem orbital.

As diferenças presentes entre os diversos modelos digitais gerados através das imagens orbitais também foram comparadas estatisticamente para verificar além do melhor modelo, qual na verdade é o de melhor benefício considerando todo o trabalho de obtenção de dados.

O trabalho apresenta um caráter inovador por trazer as imagens do recente projeto envolvendo o satélite TanDEM-X que, juntamente com seu satélite irmão TerraSAR-X, imageou toda a superfície do planeta com uma resolução de 12 m.

Abstract

Degraded areas by erosion are currently one of the major problems of land degradation, mainly in the state of São Paulo, and much remains to study in the area. The Córrego of Tucum sub-basin is a local of great public interest because it generates many environmental and social expenses and losses, and it also presents several risks.

This project carried out a historical analysis of the geomorphometry of the study area, observing how it has developed over the years considering the interventions performed, using aerial photographs.

With some data of the digital terrain models such as SRTM, TanDEM-X and quoted points some MDEs were elaborated to compare the quality of attributes generated such as example hypsometry, slope, aspect and curvature of the slopes besides the visual quality for image analysis. Specifically with the image of the year 2014 an analysis of the quality of the MDEs was performed comparing them also with points generated by the QGIS, for comparison mainly with the quoted points and the TanDEM-X image and to estimate which is the best orbital image.

The present differences between the different digital models generated by the orbital images were also compared statistically to verify beyond the best model, which in fact is the one of better benefit considering all the work of obtaining data.

The work presents an innovative character by bringing the images of the recent project involving the TanDEM-X satellite that together with its satellite TerraSAR-X, imaged or the entire surface of the planet with a resolution of 12 m.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de São Paulo, em especial ao Instituto de Geociências e ao Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Meio Ambiente por todo conhecimento transmitido e pela estrutura;

Agradeço à Capes pelo fomento deste trabalho;

Agradeço aos laboratórios de Geociências da EESC-USP, UFSCar e ao Dener Toledo Mathias pelos dados compartilhados.

Sem esses meios não seria possível este trabalho.

Todo final de ciclo é impactante de alguma forma e acredito que de todos os ciclos que passei até aqui, esse foi um dos mais difíceis e, com certeza, o mais gratificante por ter chegado até ao final.

Agradeço especialmente à minha família que me dá todo o apoio e amor que eu poderia precisar, me estimulam e caminham junto comigo. Essa etapa eu dedico totalmente a vocês. Vencemos juntos, como sempre é.

Agradeço de todo coração à melhor surpresa que esse mestrado me trouxe: meu orientador-amigo Carlos Henrique Grohmann, o Guano :)

Minhas definições de orientador foram atualizadas com sucesso! Rs Se eu cheguei até aqui hoje uma enorme parte do mérito é seu, com toda sua compreensão, ajuda e paciência. Sou imensamente grata a você, por tudo!

Agradeço com especial carinho aos meus amigos-irmãos que São Paulo me deu: Emerson, Rodolfo e Leticia (com tanto lugar lindo por aí no mundo, logo a babilônia que fomos nos reencontrar). Por todos os momentos vividos, todo apoio, todo companheirismo e motivação; vocês ajudaram a construir a Karyna que existe hoje e, ao meu ver, é a melhor versão de mim mesma até agora. Vocês tem um lugar especial no coração por toda vida!

Agradeço com muito carinho a todos meus amigos que sempre me apoiam, me incentivam e torcem pro meu sucesso, saibam que vocês são sempre parte essencial de mim.

Vocês são todos muito especiais.



SUMÁRIO

Resumo.....	4
Abstract.....	5
Agradecimentos.....	6
Lista de Figuras.....	10
1. Introdução.....	12
2 Justificativa.....	13
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	15
3.2 Objetivos Específicos	15
4. Revisão Bibliográfica	15
4.1 Processos Erosivos.....	16
4.1.1 Tipos de Feições Erosivas.....	17
4.2. Áreas Degradadas por Processos Erosivos.....	20
4.3 Fotogrametria.....	23
4.4 Modelos Digitais de Elevação.....	25
4.5 Dados de Elevação Orbitais	27
4.5.1 SRTM.....	27
4.5.2 TanDEM-X.....	28
4.6 Morfometria.....	29
4.6.1 Hipsometria.....	29
4.6.2 Declividade.....	30
4.6.3 Orientação de Vertentes.....	30
4.6.4 Curvaturas.....	31
4.7 Interpolação.....	32
4.8 Modelagem de dados ambientais.....	33
5. Caracterização da Área de Estudo.....	34
5.1 Localização e Acesso.....	34
5.2 Geologia e Geomorfologia.....	35
5.3 Clima.....	35
5.4 Hidrologia.....	35
5.5 Aspectos Ambientais.....	36
6. Metodologia.....	36
6.1 Levantamento e processamento de dados.....	37
7. Resultados e Discussão.....	39

7.1 Análise Multitemporal das Feições Erosivas.....	39
7.2 SRTM 30m Reamostrado.....	53
7.3 TanDEM-X de 30m e 12m.....	60
7.4 MDT Interpolado.....	67
8. Conclusão.....	76
9. Referências Bibliográficas.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista geral de um erosão do tipo sulco.....	18
Figura 2. Vista geral de uma erosão do tipo ravina.....	18
Figura 3. Vista geral de uma erosão do tipo voçoroca.....	19
Figura 4. Esquema de um estereopar de fotografias.....	25
Figura 5. Comparação entre MDTs e MDEs.....	26
Figura 6. Padrão de inclinação para a orientação de vertentes.....	30
Figura 7. Definição de curvaturas.....	31
Figura 8. Interpolação por triangulação.....	32
Figura 9. Localização da área de estudo.....	34
Figura 10. Área do antigo lixão.....	36
Figura 11. Erosão no córrego do Tucum em 1962.....	40
Figura 12. Erosão no córrego do Tucum em 1972.....	40
Figura 13. Erosão no córrego do Tucum em 1978.....	41
Figura 14. Erosão no córrego do Tucum em 1988.....	41
Figura 15. Erosão no córrego do Tucum em 1995.....	42
Figura 16. Erosão no córrego do Tucum em 2000.....	42
Figura 17. Erosão no córrego do Tucum em 2007.....	44
Figura 18. Erosão no córrego do Tucum em 2009.....	45
Figura 19. Erosão no córrego do Tucum em 2011.....	45
Figura 20. Erosão no córrego do Tucum em 2016.....	46
Figura 21. Áreas das erosões nos anos de 1962, 1972 e 1978.....	49
Figura 22. Áreas das erosões nos anos de 1988, 1995 e 2000.....	50
Figura 23. Áreas das erosões nos anos de 2007, 2009 e 2011.....	51
Figura 24. Gráfico da evolução da área da erosão em m ²	53
Figura 25. Histogramas dos modelos de Aspecto SRTM 30m e SRTM reamostrado	54
Figura 26. MDE de orientação de vertentes SRTM 25m.....	54
Figura 27. Mapa hipsométrico SRTM 25m.....	56
Figura 28. Histogramas e estatísticas dos dados hipsométricos SRTM 25m.....	56
Figura 29. Mapa de declividade SRTM 25m	57
Figura 30. Histogramas e estatísticas do mapa de declividade SRTM 25m.....	57
Figura 31. Mapa de curvaturas horizontal e vertical SRTM 25m	58
Figura 32. Histogramas e estatísticas das curvaturas SRTM 25m	59
Figura 33. Mapa hipsométrico TanDEM-X 30m.....	60
Figura 34. Histogramas e estatísticas do mapa hipsométrico TanDEM-X 30m.....	60
Figura 35. Mapa de declividade TanDEM-X 30m.....	61
Figura 36. Histogramas e estatísticas do mapa de declividade TanDEM-X 30m.....	61

Figura 37. Mapa de curvaturas horizontal e vertical TanDEM-x 30m.....	62
Figura 38. Histogramas e estatísticas das curvaturas TanDEM-X 30m.....	62
Figura 39. Mapa Hipsométrico TanDEM-X 12m.....	63
Figura 40. Histogramas e estatísticas do mapa hipsométrico TanDEM-X 12m.....	63
Figura 41. Mapa de Declividade TanDEM-X 12m.....	64
Figura 42. Histogramas e estatísticas do mapa de declividade TanDEM-X 12m.....	64
Figura 43. Mapa de curvatura horizontal e vertical TanDEM-X 12m.....	65
Figura 44. Histograma e estatísticas das curvaturas TanDEM-X 12m.....	65
Figura 45. Mapa hipsométrico MDT Interpolado.....	67
Figura 46. Histograma e estatísticas do mapa hipsométrico MDT Interpolado.....	67
Figura 47. Mapa de Declividade MDT Interpolado.....	68
Figura 48. Histogramas e estatísticas do mapa de declividade do MDT Interpolado....	68
Figura 49. Mapa de curvaturas horizontal e vertical do MDT Interpolado.....	69
Figura 50. Histograma das curvaturas do MDT Interpolado.....	69
Figura 51. Comparação de mapas e estatísticas do mapa de orientação de vertentes.....	70
Figura 52. Comparação entre os mapas de hipsometria de todos os modelos.....	71
Figura 53. Comparação entre os mapas de declividade de todos os modelos.....	72
Figura 54. Comparação entre os mapas de aspecto de todos os modelos.....	72
Figura 55. Comparação entre os mapas hipsométricos do SRTM reamostrado para 25m e TanDEM-X 30m.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantificação das feições erosivas.....	44
Tabela 2. Qualificação das erosões.....	47
Tabela 3. Valores das áreas afetadas pelas feições erosivas a cada ano analisado.....	52
Tabela 4. Comparação entre histogramas de todos os modelos.....	74

1. Introdução

A Região da Sub Bacia do Córrego do Tucum, localizada no município de São Pedro – SP, possui um complexo e interessante histórico tanto da evolução natural do seu terreno, como das intervenções antrópicas no mesmo. É uma área bastante estudada, se não uma das mais estudadas do estado, por se tratar de uma erosão natural e que se desenvolveu juntamente com a crescente urbanização do local e ainda hoje é de grande problemática e risco.

Localizada entre os bairros São Dimas e Santa Monica, trata-se de uma área formada por arenitos de granulação média a fina de diversas colorações com estratificação plano-paralela e cruzada, pertencentes à Formação Pirambóia e, sendo assim, muito suscetíveis à erosão.

Além do intenso processo erosivo existem sérios problemas no local como o depósito de resíduos de construção civil e rejeitos domésticos dentro das erosões, ação que foi realizada diversas vezes como medida corretiva e estava transformando as voçorocas em verdadeiros lixões municipais, além de problemas urbanos como o fluxo clandestino da água, e também ruas que acompanham a declividade do terreno facilitando o escoamento superficial além de aumentar a velocidade do escoamento e impermeabilizar o solo. Estudos também apontaram na região a presença de erosão subterrânea tipo *pipping* devido à obras de microdrenagem que foram instaladas na cabeceira do córrego e proporcionaram grande infiltração, mas sem nenhum direcionamento de fluxo e através da evolução do loteamento e ocupação dos arredores, observamos também que o local sofre um intenso processo de urbanização sem nenhum tipo de planejamento.

Este projeto buscou realizar uma análise geomorfométrica da área utilizando de modelos digitais de elevação através de dados SRTM, TanDEM-X e pontos cotados, através da análise temporal de imagens aéreas e de satélite, afim de se avaliar a situação da área como um todo fornecendo dados que possam fomentar futuras ações de remediação ou contenção, já que a área gerou e ainda gera grandes preocupações e gastos públicos, além das inestimáveis perdas ambientais.

O trabalho de fotointerpretação da evolução das feições erosivas foi especialmente pensado para essa área pois a expansão do perímetro urbano em áreas com solos arenosos pobres e/ou com topografias mais íngremes aumenta significativamente os riscos de erosão intensa e muito intensa, e o monitoramento através de fotos ao longo dos anos nos dá uma boa ideia da dinâmica do local. Seria ideal a possibilidade de se ter material fotográfico de todos os anos, mas devido ao alto

custo do trabalho e também a relativa dificuldade para a obtenção das fotografias, o acervo disponível neste trabalho já se mostrou bastante satisfatório.

A comparação de modelos elaborados através de diferente fonte de dados como fotografias, radares e pontos cotados em campo, é muito enriquecedor em relação à tomada de decisão de qual os melhores dados para a realização de cada tipo de trabalho, levando em consideração o custo-benefício de cada.

2. Justificativa

Áreas degradadas por erosão são atualmente um dos maiores problemas de inutilização do terreno, principalmente no estado de São Paulo. O conhecimento sobre os processos erosivos – seu estado, evolução e impacto, tanto ambiental como humano – é de extrema importância para que se possam aplicar medidas de correção apropriadas, otimizando e também prevenindo os altos custos para a recuperação e controle das áreas afetadas, além do controle ambiental necessário e o cuidado exigido para a população.

No município de São Pedro-SP encontram-se diversas áreas afetadas por esses processos, entre essas áreas está a cabeceira da bacia do córrego do Tucum que apresenta registro desses processos desde a década de 1960 e, por se tratar de uma erosão natural e de grande proporção, é um local de diversos estudos científicos e projetos a fim de controlar e/ou recuperar o local, que mesmo com todos os esforços e medidas tomadas, continua apresentando intensa dinâmica com diferentes características e particularidades dos processos até atualmente. É importante ressaltar que todas a erosão que observamos originalmente desde o ano de 1962 foram agravadas e se desenvolveram aceleradamente após a intensificação da urbanização ao redor do local.

As feições erosivas são classificadas também pelo local que ocorrem, podendo ser urbanas ou rurais. A área de estudo em questão está dentro do limite urbano e por isso se faz necessário detalhar um pouco melhor essa categoria.

A erosão urbana no Brasil distingue-se das formas de erosões naturais e suas derivadas rurais por seus novos condicionantes, seus mecanismos exclusivos, os grandes volumes de materiais envolvidos e o papel representado pelo assoreamento (Magalhães, 2001).

Almeida Filho (1998) diz que a erosão urbana está associada a uma junção de fatores e fenômenos que englobam o intenso processo de urbanização, e se esse processo ocorre sem um planejamento adequado, juntamente com a exploração mineral

e crescimento industrial formam um conjunto que estimula as atividades humanas e o crescimento dos loteamentos.

Esse é o quadro inicial do processo de urbanização tornando-o um cenário bastante favorável para o bom desenvolvimento urbano, desde que esse fosse realizado com planejamento prévio e foco nos riscos potenciais do local – situação que não ocorreu, e com o aumento de áreas pavimentadas, com a baixa infiltração das águas e aumento do escoamento superficial entre outros problemas de drenagem urbana, houve acentuada aceleração dos processos erosivos, acarretando no surgimento de ravinas e voçorocas em pontos de maior suscetibilidade e gerando uma considerável perda para a população, para poder público local e considerável perda para o ambiente.

O trabalho apresenta um caráter inovador que é a utilização de dados TanDEM-X que oferecem uma precisão sem precedentes comparado com outros conjuntos de dados de elevação globais e é baseada numa base de dados uniforme, afim de compará-los com outros tipos de dados como SRTM e dados obtidos em campo para fomentar decisões no momento da escolha das ferramentas de estudo.

Sendo assim e dado o histórico da área estudada, tanto em relação aos processos erosivos quanto em relação as intervenções e gastos aplicados, nota-se a importância desse estudo, principalmente quando aplicado a um caso de erosão urbana de extensão e importância como a localizada no Córrego do Tucum, gerar novos dados e diagnósticos que colaborem com projetos de recuperação desta e de outras áreas e viabilizar a adoção de práticas que são fundamentais a sustentabilidade ambiental, sem prejuízos à economia e à vida das futuras gerações.

3. Objetivos

O objetivo principal deste projeto visa a análise geomorfológica da área da Sub-bacia do Córrego do Tucum e seus processos erosivos, com ênfase na atual estrutura e dinâmica do terreno considerando diferentes tipos de dados.

Com base nesse levantamento e em outros trabalhos desenvolvidos na área busca-se gerar informações que deem embasamento para possíveis ações mitigadoras na área.

3.1 Objetivo geral

Esse projeto constituiu na análise histórica do desenvolvimento da erosão do córrego do Tucum através de imagens aéreas e de satélite e também a análise geomorfométrica da Sub-Bacia do Córrego do Tucum, utilizando principalmente de Sistemas de Informações Geográficas (cartas e imagens orbitais georreferenciadas), Sensoriamento Remoto (fotografias e imagens aéreas), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e de Terreno (MDT).

3.2 objetivos Específicos

- Analisar o desenvolvimento histórico das feições erosivas;
- Analisar estrutura e dinâmica da área de estudo;
- Analisar as características geomorfométricas da área através dos Modelos Digitais de Elevação e Terreno;
- Comparar a qualidade das informações geradas a partir dos dados SRTM, TanDEM-X e dados de estação total

4. Revisão Bibliográfica – Fundamentação Teórica

Uma erosão pode ser definida como o resultado do processo de perda da camada superficial do solo pela ação de fatores naturais como o vento e o escoamento superficial da água, em diversas condições climáticas e físicas. Resulta então em uma perda significativa para o ambiente pois reduz a fertilidade do local, tornando o solo denso e fino e dificultando a penetração das raízes, reduz também a capacidade de reter água e os nutrientes são lavados com as partículas de solo erodidas (Araújo *et al.*, 2007).

Em todo o mundo podemos observar problemas relacionados aos processos erosivos que se desenvolvem e são classificados de acordo com o local que ocorrem, podendo ser erosões rurais e urbanas, sendo a segunda descrita com maior detalhe neste trabalho por tratar-se do foco do estudo; e também em erosões laminares e lineares, onde esta segunda, de acordo com seu desenvolvimento pode ser classificada em sulcos, ravinas e voçorocas. Essa situação é agravada por características climatológicas, hidrológicas, geomorfológicas através de processos intempéricos, também pedológicas do local e no caso das áreas urbanas, principalmente pelo uso inadequado do solo e pelo crescimento desordenado das cidades.

O conhecimento sobre os processos erosivos – seu estado, evolução e impacto, tanto ambiental como socioeconômico – é de extrema importância para a elaboração de projetos e para que medidas adequadas sejam adotadas.

4.1 Processos Erosivos

Existem muitos fatores que em conjunto acabam por desencadear esses processos, podemos citar: a suscetibilidade dos materiais inconsolidados, índice pluviométrico do local, além da geomorfologia e cobertura do solo. A erosão pode ocorrer naturalmente, fazendo parte da dinâmica e equilíbrio ambiental ou pode ser acelerada pela interferência humana, sendo esse um dos fatores primordiais para o desequilíbrio desses processos.

Os processos erosivos, quando não naturais, tem início na utilização indevida do solo, geralmente sem planejamento adequado e sem a consciência ambiental necessária, acarretando a diminuição da proteção vegetal e surgindo assim os primeiros sintomas da possibilidade de erosões em um dado local (Cunha & Guerra, 1995).

A erosão acelerada pode ser de dois tipos dependendo de como ocorre o escoamento superficial: laminar quando causada por escoamento difuso das águas pluviais, resultando numa remoção da camada horizontal mais superficial do solo e de maneira progressiva, e linear quando causada pela concentração das águas em um escoamento único causando incisões no terreno (na forma de sulcos, ravinas e voçorocas), e dentre essas, as voçorocas são o estágio mais avançado e mais preocupante desse processo (DAEE, 1990).

Existem diferentes conjuntos de fatores que podem desencadear uma erosão e, dentre elas, podemos citar desde a retirada da cobertura vegetal natural para cultivo de monocultura até o corte de um talude para a viabilização de construção de uma estrada ou para outro uso qualquer (que provavelmente irá causar uma erosão bem maior). As outras formas de agressão que podem levar a uma voçoroca passam pelo desmatamento, queimadas e o crescimento desordenado dos centros urbanos

A erosão em voçorocas acontece com frequência quando os solos são profundos e facilmente penetráveis pela água, com acentuada declividade e/ou acentuado índice pluviométrico, assim como quando se cultiva o solo sem maiores cuidados. Esse tipo de erosão pode ter início tanto em erosões laminares quanto lineares, sendo mais comuns nas lineares.

Outro grande prejuízo causado pelas erosões em áreas urbanas é de caráter social e econômico, diz Ridente (2001), pois segundo ele a evolução deste leva à destruição de áreas loteadas e construídas, moradias e equipamentos públicos como ruas, sistemas de esgoto, sistemas de drenagem, redes elétricas, além de poder levar a eventos que ameacem a vida humana. Almeida Filho (1998) ainda ressalta que além de todos esses problemas, a erosão é um fator limitante da expansão urbana pois gera altos custos de correção, desenvolvimento de possíveis focos de doenças (pela prática comum de aterro com lixo urbano e despejo de esgoto, situação que encontramos também na área estudada), e assoreamento de galerias e fundos de vale. Se o processo erosivo for de nível grave, de grande porte, o dano ambiental também pode ser estimado com base na degradação do solo e da difícil recuperação da área, com possibilidade de não retornar ao seu estado original como estava antes do evento, causando uma grande perda também ecológica.

4.1.1 Tipo de Feições Erosivas

O tipo de erosão mais preocupante, principalmente em áreas urbanas, é a erosão linear pois, dependendo da sua gravidade, pode remover quantidades consideráveis de solo (materiais inconsolidados), causando diversos problemas de ordem socioambiental, como discutido anteriormente.

A existência de processos erosivos do tipo linear dentro ou próximo a áreas urbanas, principalmente do grau de voçorocas, torna ainda mais crítica a gestão urbana pois esses fenômenos podem chegar a interferir diretamente na vida dos habitantes (Ridente, 2001).

A erosão linear também acontece de forma natural, mas em áreas urbanas acaba sofrendo aceleração pelo uso inadequado do solo e principalmente pela retirada da cobertura vegetal ao redor dos corpos d'água e topos de morro, juntamente com a impermeabilização do solo que forma cursos preferenciais de escoamento. Esse tipo de erosão é subdividida em três – *sulcos*, *ravinas* e *voçorocas* - e classificada através do seu estado de degradação.

- Sulco: o DAEE (1990) descreve esse tipo de erosão como sendo pequenas incisões que o correm na superfície do terreno em formas de filetes bem rasos. Apresentam uma profundidade e largura inferior a 50 centímetros, e representam as áreas onde a erosão laminar é mais intensa. Exemplo de sulco na figura 1 abaixo:



Figura 1- Vista geral de uma erosão do tipo sulco.

Ravinas: são formadas essencialmente pelo escoamento superficial da água, concentrada em um caminho preferencial de fluxo, aprofundando assim o sulco e dando continuidade ao processo erosivo. É agravado principalmente pela velocidade de escoamento da água e posterior acúmulo desta, formando um canal preferencial para o escoamento e formando uma pequena à média incisão na superfície do solo (Cunha&Guerra, 1995). (Figura 2).



Figura 2- Visão geral de uma erosão do tipo ravina.

- Voçorocas: são formadas pelo desenvolvimento das ravinas até ao ponto de interceptação do lençol freático, onde se pode observar grande complexidade de processos do meio físico devido à ação concomitante das águas superficiais e subsuperficiais (Rodrigues, 1982). Rodrigues ainda explica que sua ocorrência pode estar relacionada a situações particulares como contatos, falhas geológicas e zonas de menor coerção.

Segundo Ridente (2001) uma voçoroca é considerada de grande porte quando atinge dimensões com largura superior a 5m e profundidade superior a 2m de “abertura”, com bordas abruptas e ruptura instável do terreno. Podemos observar um exemplo desse tipo de processo na área estudada, como vemos na Figura 3 a seguir:



Figura 3- Visão geral de uma erosão uma voçoroca.

Se as incisões no terreno que circulam água não forem corrigidas desde o começo, um pequeno sulco pode evoluir para uma feição bem maior até chegar ao porte de uma voçoroca, podendo mover grandes volumes de solo e destruir casas, obras públicas e causar danos ambientais irreparáveis.

4.2. Áreas Degradadas por Processos Erosivos

O processo de formação dos solos que recobrem boa parte da superfície terrestre ocorre contrabalanceando os processos pedogênicos de alteração da rocha através de intemperismos, comandados por agentes físicos, químicos e orgânicos, e o processo de erosão dos mesmos. No entanto quando ocorre certo desequilíbrio entre a velocidade do processo de formação dos solos e o processo erosivo é que temos origem ou ao certo grande propensão ao desenvolvimento de erosões. (DAEE, 1990).

Trabalhos como de Valentin *et al.* (2005), Lal (2001) e Hudson&Alcántara–Ayala (2006) consideram o estudo dos problemas relativos à degradação ambiental, decorrente dos processos erosivos, como extremamente importantes pois viabiliza a adoção de práticas que são fundamentais à sustentabilidade ambiental, sem prejuízos à economia e à vida das futuras gerações. Para tal se faz necessário o entendimento do meio ambiente quanto aos seus processos naturais quanto aos que são acelerados devido às atividades humanas.

A elevação da escala das atividades humanas tem provocado grandes e rápidas mudanças nos ecossistemas da Terra. De acordo com o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) as alterações sofridas pelos ecossistemas do planeta hoje não se comparam a nenhum outro período da história humana e, embora tais mudanças tenham contribuído significativamente para ganhos líquidos no desenvolvimento e crescimento econômico, os ganhos foram alcançados à grandes custos na forma de degradação de serviços ecossistêmicos como um todo.

O primeiro passo para a elaboração e realização de qualquer tipo de projeto seja ele ambiental, de engenharia ou de qualquer outra área é ter conhecimento em relação à origem, o tipo, evolução e estágio da degradação, o que demanda um estudo multidisciplinar envolvendo diversas áreas do conhecimento.

Sabendo que existe termos que são diferentes entre si, mas tentam descrever os mesmos fenômenos ou definir uma situação, levando a possíveis interpretações errôneas, foi decidido que aqui adotaremos a definição de áreas degradadas para Parrotta (2003) e IBAMA (1990) que mais se enquadram na abordagem desse trabalho.

Segundo Engel & Parrotta (2003) áreas degradadas são aquelas caracterizadas por solos empobrecidos e erodidos, instabilidade hidrológica, diversidade biológica e produtividade primária reduzidas. Nos ecossistemas terrestres isso significa na prática a retirada e destruição da cobertura vegetal de da fauna local, perda da camada fértil do solo e alteração na qualidade ou na existência da vazão do sistema hídrico (Minter/IBAMA, 1990).

Uma área que tenha sofrido um impacto que possa impedir ou diminuir de maneira considerável sua capacidade de “retornar” de forma natural ao seu estado original – fator chamado resiliência ambiental -, antes de ter sofrido a perturbação, é denominada como área degradada. Se a área mesmo após o impacto conserva a sua capacidade de se recuperar naturalmente, a ela damos o nome de área perturbada (Carpanezzi *et. al*, 1990).

Nas áreas degradadas então se faz necessária uma intervenção antrópica para realizar para a recuperação da área, pois a mesma perdeu a sua capacidade de regeneração natural. Munshower (1994) aponta quatro termos usados com frequência na área de recuperação de áreas degradadas são: restauração, recuperação, reabilitação e revegetação (Franchi, 2000). Embora os termos possam causar certa confusão, podemos observar que refletem conceitos bem diferentes:

- a) *Restauração*: reprodução das condições exatas do local tais como eram antes de serem alteradas, ou seja, reconstituir o ecossistema com sua forma e função originais.
- b) *Recuperação*: torna a área que foi degradada novamente aproveitável para uma determinada função, ou seja, as condições ambientais não voltarão às condições originais.
- c) *Reabilitação*: ocorre sem a intervenção do homem, quando é fornecido tempo suficiente para que o ecossistema se recupere e equilibre novamente. A reabilitação é acelerada dependendo do tipo de material existente na zona das raízes, de forma que se o local ainda conservar parte do seu “banco de sementes” natural e alguma cobertura vegetal, o processo se desenvolve mais rapidamente.
- d) *Revegetação*: seria o plano de recuperação já implantado, ou seja, a área já em processo de recuperação. Acontece através de reconstituição da cobertura de vegetal daquele solo, podendo ser uma cama de gramínea ou o plantio de outras espécies vegetais

Embora exista muita divergência dos autores em relação aos termos citados a cima e suas definições, adotaremos em especial o termo recuperação e a definição proposta pelo IBAMA (1990) pois engloba mais conceitos e diz que a recuperação implica que o local degradado será utilizado de acordo com o plano pré-estabelecido para o uso do solo. Sendo assim entendemos que uma condição estável deverá ser obtida de acordo com os valores ambientais, econômicos, estéticos e sociais do local.

Vários trabalhos como de Oldeman (1994) e Lal (2001) mostram que a degradação do solo continuará a ser uma importante questão global para os próximos séculos, devido ao seu impacto negativo em relação a perda de terrenos urbanos, na

produtividade agrônômica, no ambiente e seu equilíbrio ecológico, e o seu efeito sobre a segurança alimentar e a qualidade de vida das pessoas.

Estudos realizados em diversas áreas no Brasil que apresentam algum tipo de processo erosivo indicam que a evolução das erosões são principalmente devido aos seguintes aspectos: ocupação de encostas sem a devida infraestrutura de drenagem – aqui são diversos os fatores que podem acelerar esse processo, desde a retirada vegetal até a impermeabilização do terreno -, urbanização e núcleos habitacionais que são instalados sem planejamento adequado e sem critérios técnicos que levem em consideração os impactos causados até obras de drenagem mal planejadas (IDE, 2009).

Em 1997 o Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) concluiu um estudo elaborado em convênio com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) intitulado Diagnóstico da Erosão no Estado de São Paulo e neste estudo revelou-se a existência de cerca de 6.700 feições erosivas no estado, e a maior parte delas já no estágio de voçoroca, de média a grande porte.

Além das atividades humanas já citadas que interferem nos processos erosivos acelerando o seu desenvolvimento, como por exemplo a retirada da cobertura vegetal e a urbanização sem planejamento prévio, Franchi (2000) aponta algumas outras causas e situações que aceleram ou agravam os processos erosivos:

- Sob um ponto de vista físico a área deve se apresentar isenta de processos erosivos significativos e ser geotecnicamente estável, sem riscos de escorregamentos de taludes ou qualquer outro tipo de movimento de massa;

- Sob o ponto de vista químico o local não pode apresentar risco de contaminação do solo ou da água superficial ou subterrânea, sendo isenta de materiais, insumos ou substâncias utilizadas no empreendedorismo e de alguma forma incorporados à área que possam oferecer risco nesse sentido;

- Sob o ponto de vista biológico é necessário que a área recuperada mostre condições de se auto sustentar, ou seja, que seja capaz de manter condições de rendimento equivalente ao encontrado em áreas semelhantes e na mesma região, por exemplo quando a área é utilizada para fins agrícolas ou agroecológicos de sua preferência;

Os estudos sobre os processos erosivos são inúmeros, porém concentrados nos aspectos intrínsecos do processo em si, e poucos voltados para os aspectos da degradação. No Brasil, destacam-se os estudos de problemas relativos a fertilidade e aqueles diretamente relacionados a degradação da área em termos de produção agrícola.

É muito importante então observar que, os estudos sobre a formação das feições erosivas e sua mitigação devem ser realizados de maneira integrada no espaço, atentos às diferentes óticas do processo. A Teoria Geral dos sistemas possibilita uma visão mais alternativa da situação, das causas desse tipo de dano ambiental pois considera também os fatores humanos e naturais (Daniel, 2009).

Mesmo com as tecnologias atuais o controle dos processos erosivos ainda se mostram insatisfatórios. Isso não se dá por falta de conhecimento sobre os processos erosivos e sim pela não priorização de projetos adaptados às particularidades ambientais e do terreno de cada local. Seria necessário um projeto que relacione a melhor técnica de controle, sua viabilidade econômica e características do terreno para então realizar as etapas de trabalho necessárias para a prevenção e um controle satisfatório desses processos, sem que isso interfira nas etapas anteriores e futuras.

As ravinhas e voçorocas já instaladas por serem mais graves exigem soluções que possam ser implantadas em larga escala e de modo simplificado, que justifique o investimento público e que devolva essas áreas, o mais rápido possível, para uso.

As principais obras de controle e recuperação de áreas atingidas por voçoroca compreendem: o disciplinamento do fluxo de água, tanto superficial como sub-superficial através da implementação dos sistemas de drenagem; obras de retaludamento, revegetação, obras de contenção de taludes, obras de pavimentação, obras de reaterro e obras de barramento.

Esses não são os únicos métodos existentes, mas são os mais comumente usados e mais conhecidos dentro das obras de engenharia. A regeneração natural seria o procedimento de menor custo e mais simples de recuperar uma área degradada por erosão, mas o tempo necessário para uma área se regenerar naturalmente está intimamente ligado ao grau de degradação, sendo os fatores condicionantes mais importantes os ligados à disponibilidade de sementes do banco existente antes da perturbação ambiental (Kobiyama, 2001).

As técnicas em Bioengenharia, dentre todas as técnicas de contenção e estabilização de erosão, são as que tem obtido maior sucesso em seu objetivo pois trata do problema de uma forma bastante completa, de forma mais sustentável e eficiente.

4.3 Fotogrametria

Para realizar uma análise de um terreno ou bacia são utilizadas interpretações de fotografias aéreas e mapas históricos que mostram claramente a correlação entre

mudanças no uso do solo e o desenvolvimento da erosão, permitindo uma estimativa da quantidade de material erodido e também a área afetada pelo fenômeno (Araújo, 2007).

Marchetti & Garcia (1977) definem a fotogrametria como a ciência de “se obter medidas dignas e de confiança por meio de fotografias”.

As fotografias podem não ser um mapa e nem conterem informações tão já bem definidas ou ressaltar alguma característica específica da área, porém, muito mais informações podem ser observadas nelas em comparação a uma mesma área observada em um mapa. Mudanças na tonalidade e no relevo permitem observar grande quantidade de informações referentes aos solos e às rochas de uma determinada área de estudo, por exemplo, e também possibilitar a observação dos canais de drenagem e como estes estão dispostos na área, afloramentos rochosos, falhas e fraturas.

A fotointerpretação é definida por Marchetti e Garcia (1977) como “a arte de examinar as imagens dos objetos nas fotografias e de deduzir a sua significação”. A fotointerpretação auxilia muito os trabalhos em campo, no entanto, não chega a substituí-los pois estes também servem para verificação *in situ* das informações obtidas através das fotointerpretação e validação dos dados. Os trabalhos em campo são também otimizados pela análise prévia ou posterior de fotografias aéreas como por exemplo no planejamento do roteiro a ser seguido no campo, este pode ser traçado com base nos pontos de interesse observados nas fotos e a avaliação das dificuldades que poderão aparecer durante a execução da pesquisa e podem ser evitadas com base nas observações das fotografias.

A fotografia aérea tem grande utilidade na elaboração de mapas planialtimétricos. Isso porque ela permite, através de um par de fotografias aéreas e um estereoscópico, a visão em 3ª dimensão da região e a delimitação das curvas de nível, além de que o uso de fotos aéreas é um método barato e que apresenta bons resultados nas investigações de superfície. Por fim, a leitura fotográfica é um assunto para determinações gerais, tais como escala, orientação geográfica, estação do ano, identificação das linhas correspondentes ao perímetro, estradas de rodagem, estradas de ferro, importantes cursos d'água e classificação das principais formas topográficas segundo Marchetti e Garcia (1977). E com o auxílio da fotointerpretação, uma análise mais detalhada será feita de alguns desses atributos.

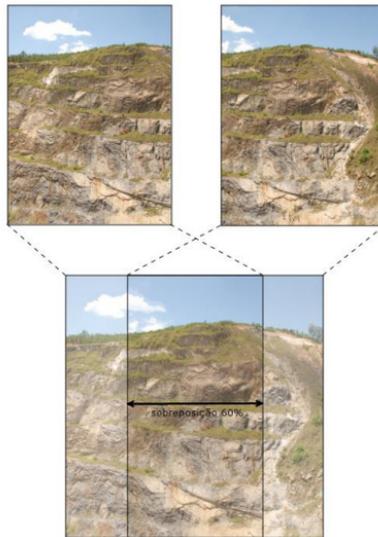


Figura 4: Esquema de um estereopar de fotografias (Viana, 2015)

A utilização de fotografias aéreas é essencial em inúmeros trabalhos. Ferreira (2008) realizou um inventário de feições erosivas com base na obtenção dos registros das feições a partir de fotografias aéreas alegando que, imagens de sensoriamento remoto antigas apresentam resoluções mais baixas, e as modernas de melhor resolução, apresentam custo elevado. Gomes (2002) também destaca o uso de fotografias aéreas como sendo eficaz e de baixo custo na obtenção de informações preliminares do meio físico. A mesma autora em seu trabalho realizou, a partir de fotos aéreas, a análise multitemporal da área de estudo e evolução histórica das feições erosivas, além de levantar informações gerais relacionadas às atividades antrópicas.

4.4 Modelos Digitais de Elevação

As primeiras referências aos Modelos de Elevação, devido às limitações tecnológicas da época, não eram digitais e sim com dados pontuais (x,y,z) e perfis morfológicos, utilizando cartões perfurados. A primeira descrição de Modelos Digitais de Elevação foi feita por Miller&Laflame (1958). Mais precisamente, o termo Modelo Digital (ou Numérico) de Terreno (MDT) é reservado aos dados que representam o nível real do terreno, enquanto que os Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem representar, por exemplo, o dossel das árvores em áreas densamente florestadas e não o terreno subjacente (Grohmann, 2015).

Os modelos digitais de elevação podem ser construídos de diferentes maneiras, desde de técnicas de sensoriamento remoto como fotogrametria digital de imagens de satélite e/ou imagens aéreas ou altimetria a laser, por exemplo, obtemos imagens e dados pré-processados; e através de pontos cotados ou curvas de nível extraídos de cartas topográficas ou coletadas em campo, se fazendo necessário a interpolação de dados para a geração de MDEs.

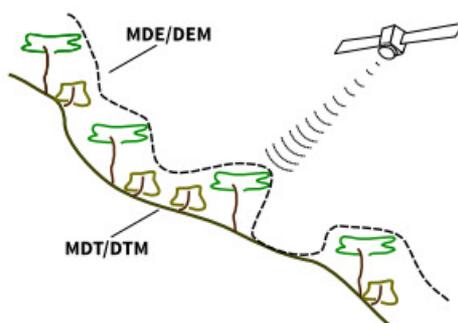


Figura 5: Comparação entre MDTs e MDEs (Grohmann 2015)

Com a difusão e a evolução dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a obtenção, a análise e o processamento de atributos do relevo tem se tornado essenciais para a compreensão da paisagem, dando suporte a tomada de decisão para questões relacionadas à conservação ambiental ou expansão territorial (Listo & Vieira, 2010).

Dados topográficos são adquiridos em mapas com dados altimétricos em diferentes escalas, mas imagens por interferometria e imagens orbitais de pares estereoscópicos vêm sendo utilizadas com maior frequência. Cada uma dessas fontes tem suas próprias características com relação à diferentes sensores de aquisição de dados, formatos, custos e resoluções (Oliveira *et al.*, 2013).

Os produtos gerados por técnicas de sensoriamento remoto, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE), são amplamente reconhecidos como informação essencial para diversas áreas de pesquisa, sendo o produto base para o conhecimento do relevo da superfície terrestre, subsidiando estudos relacionados aos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos (Moore *et al.*, 1991).

Recentemente, com a conclusão do projeto “Mapeia SP” da EMPLASA (Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A), o Estado de São Paulo passou a contar com um recobrimento aerofotogramétrico completo que, entre outros produtos, disponibilizou um Modelo Digital de Superfície (MDS) com alta resolução espacial. Juntamente com este MDS, surge um questionamento entre pesquisadores da área sobre o uso potencial e limitações destes dados para geração de atributos do relevo,

em detrimento de outros produtos já consolidados, como os próprios SRTM e ASTER (Barros *et al.*, 2015)

Em função das diferentes formas de aquisição dos produtos de superfície disponíveis, bem como suas diferentes resoluções, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos que procurem averiguar a consistência das informações derivadas de diferentes fontes de dados e, mais do que isso, analisar se a resolução mais refinada de um dado é transmitida às informações processadas a partir dele e para qual gênero de análise esse se faz mais adequado.

4.5 Dados de elevação orbitais

Um ponto chave para a viabilidade técnica dos modelos digitais de elevação (MDE) é sua preparação. A utilização de bases topográficas digitais obtidas por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a carência de mapeamentos, sobretudo na África, Oceania e América do Sul além de viabilizar os projetos em relação aos custos de obtenção de dados (Valeriano, 2004).

4.5.1 SRTM

A missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) consistiu em um levantamento topográfico da parte continental do planeta a partir da cooperação entre a National Aeronautic and Space Administration (NASA), o Centro Espacial Alemão (DLR), a Agência Espacial Italiana (ASI) e a National Imagery and Mapping Agency (NIMA), do Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos.

Resultou em um modelo digital de elevação entre as latitudes 60^º Norte, na extremidade sul da Groelândia, e 54^º Sul na Terra do Fogo, a partir de dados de radar interferométrico e percorrendo 176 órbitas que imagearam 80% da superfície terrestre durante 11 dias em fevereiro de 2000 (Grohmann, 2015).

As informações altimétricas obtidas através dos dados SRTM são produzidas por interferometria de radar entre dados de um mesmo ponto na superfície a partir de dois radares de abertura sintética, um deles e composto por um sistema na banda C (5,6 cm) sob responsabilidade da NASA, e o outro na banda X (3,1 cm) sob responsabilidade do DLR.

Ao total foram três versões lançadas pela NASA, das quais em cada uma delas procurou-se melhorar as edições de imagem como por exemplo em relação à remoção de valores espúrios, como nos corpos d'água ou terrenos completamente vazios. A terceira versão dos dados SRTM (também chamada de "SRTM Plus") foi liberada em

20 de novembro de 2013 pelo Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC).

Após cada uma das modificações, os dados brutos foram processados pela NASA e, apesar de obtidos com resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30m no equador), foram inicialmente disponibilizados com este nível de detalhe apenas para a área dos Estados Unidos; para os outros países, houve uma reamostragem dos dados para 3 segundos de arco (~90 m) de resolução espacial. Além dessas versões existe também uma versão produzida pelo Consortium for Spatial Information (CSI) do Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR) com a finalidade de fornecer uma cobertura topográfica contínua e sem vazios para todo o mundo (Grohmann, 2015); e também uma versão de 2010 chamada DLR SRTM X-SAR, que é um trabalho da agência espacial alemã para disponibilizar gratuitamente os dados do SRTM X-SAR, que apresenta resolução de 1 segundo de arco mas ainda sim possuem uma cobertura bastante inferior em relação à banca C e banda X.

No entanto, deve-se lembrar que são dados remotos e que, como tais, trazem consigo as limitações do sistema e estão sujeitos a uma série de fatores que alteram a relação de veracidade para com a paisagem existente (Valeriano, 2004). A resolução de aproximadamente 90 m dos dados SRTM disponíveis pode ser considerada razoável para análises em escalas pequenas ou médias mas não pode ser aplicada em estudos de detalhe. Sendo assim uma alternativa que auxilia em relação à análise morfométrica e de cobertura é a interpolação de dados, criando uma nova camada de dados vizinhos cruzados entre si, e assim resultando em uma maior coerência em relação à angulação da superfície do modelo. Isso pode ser realizado, por exemplo ajustando apenas em sua porção inicial e limitando o cálculo da krigagem a um raio de busca compatível com um matriz de 3x3 ou 5x5 células dos dados originais (Valeriano, 2006).

4.5.2 TanDEM-X

No dia 21 de junho de 2010 a missão TanDEM-X foi lançada com sucesso a partir de Baikonur, localizado no Kazaquistão tendo como objetivo a produção de um Modelo Digital de Elevação Global, com imagens de resolução espacial de 12m, gerado por radar InSAR (interferometria de radar de abertura sintética) com dois satélites quase idênticos: TanDEM-X e TerraSAR-X. Foi considerado inovador e tecnologicamente bastante avançado não só pela qualidade do imageamento mas também pela forma como os satélites operaram.

O projeto foi proposto em meados dos anos 80 pelo brasileiro Alberto Moreira, na época estudante do Instituto Tecnológico Aeroespacial (ITA), à NASA que rejeitou a

proposta por considerar um projeto de alto risco e certamente uma missão já perdida, pois a tecnologia necessária para a missão ainda não estava completamente desenvolvida. Os satélites funcionariam de forma similar à que funciona os olhos humanos, captando duas imagens com uma pequena diferença de angulação entre si mas que juntas criam as noções e informações de profundidade. Os satélites voam numa trajetória helicoidal, que lembra a estrutura do DNA, e são controlados por terra e separados cerca de 200 metros entre si, orbitando a Terra a 514 km de altitude e 28.000 km/h (DLR, 2010).

O projeto em pouco mais de três anos de coleta de dados pôde examinar toda a superfície terrestre da Terra de 150 milhões de quilômetros quadrados ao menos duas vezes.

4.6 Morfometria

A morfometria é o estudo dos aspectos quantitativos do relevo, como as variáveis relacionadas às medidas de altura, comprimento, largura, superfície, volume, forma e etc. As principais variáveis morfológicas que condicionam o tipo e a intensidade dos processos erosivos são: forma, declividade orientação e extensão das vertentes e curvaturas. Essas e outras variáveis morfométricas podem ser obtidas através de levantamentos em campo de dados altimétricos e de imagens aéreas ou de satélite, em cartas topográficas ou em modelos digitais de elevação (MDE).

4.6.1 Hipsometria

É um valor pontual de elevação a cima do nível do mar na superfície terrestre. Em um MDE cada pixel representa a taxa de amostragem da elevação na área de estudo e corresponde ao dado base para as análises geomorfológicas (Franklin, 1987). É a partir desse dado, da elevação, que calculamos os demais atributos do MDE para a elaboração de mapas, inclusive o mapa hipsométrico. O mapa é obtido após a classificação altimétrica do relevo em intervalos regulares permitindo o entendimento da topografia e noções de estabilidade e suscetibilidade do terreno.

4.6.2 Declividade

É a inclinação do relevo em relação ao plano horizontal, podendo ser expresso em graus ou porcentagem e talvez represente o parâmetro mais importante da análise geomorfológica do terreno pois os ângulos de declividade controlam a disponibilidade da força gravitacional para um trabalho das formas de relevo, responsáveis pela intensidade e frequência dos possíveis processos erosivos (Franklin, 1987).

As inclinações do terreno são apresentadas na forma de porcentagens ou graus, podendo atingir valores maiores que 100% (45°), principalmente nas encostas de serras e morros, e são definidas em intervalos de classes significativas para a área (Garcia, 2014). Por padrão o mapa de declividade tem valores em graus, ou opcionalmente em porcentagem.

4.6.3 Orientação de vertentes

Aspecto, ou também chamado de orientação de vertentes, ilustra o sentido de fluxo pluviométrico proveniente da encosta e a susceptibilidade de diferentes porções desta, representa o vetor de direção da declividade, muito importante para o estudo de movimento de massas. O mapa de orientação de vertentes tem valores iniciando em Leste, crescendo em sentido anti-horário: 90° corresponde a Norte, 180° a Oeste, 270° a Sul e 360° a Leste. O valor 0 (zero) é usado para identificar áreas de orientação indefinida quando a superfície é plana (declividade zero), como ilustrado na imagem abaixo:

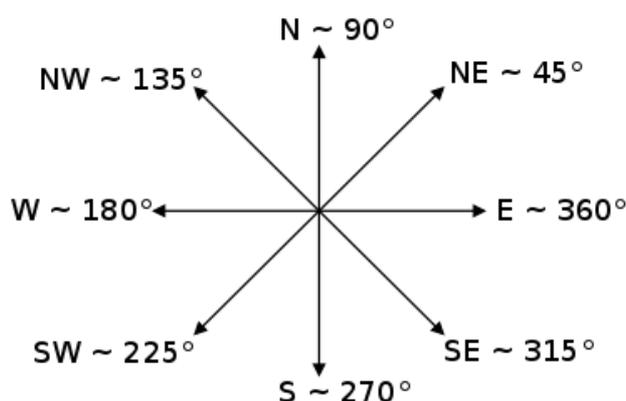


Figura 6. Padrão de inclinação para orientação de vertentes.

O mapa de orientação de vertentes compõe juntamente com o mapa de declividade a orientação geométrica da exposição do relevo, dando a sensação de três dimensões em representações que mostram o que chamamos de relevo sombreado.

A sequência de pontos (pixel) alinhados pela orientação de vertentes, numa mesma declividade determina o que se chama de linhas de fluxo, que são a representação de um caminhamento preferencial ou esperado do escoamento pluvial.

4.6.4 Curvaturas

A curvatura é um cálculo derivado da elevação, como uma segunda derivada e por esse motivo pode apresenta uma maior sensibilidade a possíveis erros que possam existir nos dados de elevação, causados pela interpolação, por falha de valor de dados, entre outros (Shary *et al.*, 2002). É representada como curvatura vertical (*profile curvature*) e curvatura horizontal (*plan curvature*) e pode-se considerar que a variação do gradiente e da orientação de vertentes representa, respectivamente, a curvatura vertical e a curvatura horizontal do terreno, como podemos observar na figura 7 (Grohmann, 2015).

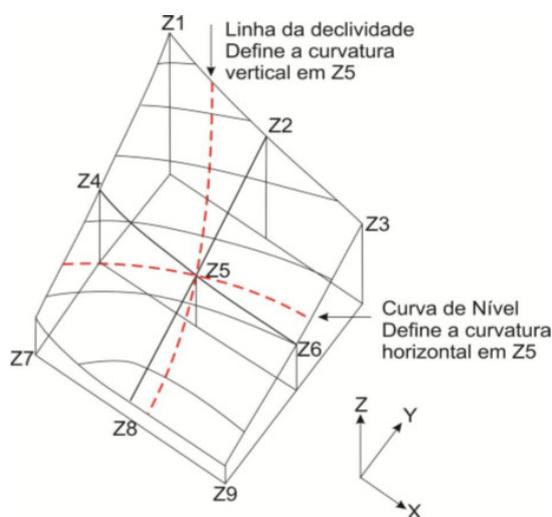


Figura 7. Definição das curvaturas (Garcia, 2014).

As curvaturas são associadas à forma côncava/convexa da forma de relevo e está também diretamente relacionada à declividade.

É utilizada em estudos geomorfológicos e geotécnicos para definição da suscetibilidade do terreno à ocorrência de movimentos de massa, pois as formas côncavas ou convexas do terreno são indicativos da estabilidade inicial da encosta.

Formas côncavas apresentam estabilidade inicial maior e formas convexas apresentam estabilidade inicial menor (Garcia, 2014). As formas côncavas, devido sua inclinação podem, mesmo mais estáveis inicialmente, proporcionar um acelerado fluxo de movimentação de massas, aumentando progressivamente sua velocidade, enquanto as formas convexas apresentam a probabilidade inversa, de desaceleração do fluxo e posterior acumulação no pé da encosta ou talude.

4.7 Interpolação

A interpolação é uma maneira de reamostrar os dados de um MDE, calculando novamente os valores de altitude de cada ponto a partir do cruzamento de dados dos pontos vizinhos, criando assim uma cobertura mais uniforme. É uma das tarefas mais comuns em SIGs e pode ser usada em diversas modelagens e simulações (Grohmann, 2015). Um bom exemplo dessa ferramenta é a geração de MDEs a partir de valores pontuais de elevação, extraídos de cartas topográficas, lasers, imagens, estação total ou curvas de nível.

Dentre as diversas formas de interpolação de pontos, que variam geralmente na quantidade de pontos e área interpolados, existe a Rede Triangular Irregular, mais conhecida pela sigla em inglês TIN (*Triangular Irregular Network*), com ou sem linhas de descontinuidade.

Esse modelo é composto por pontos originais, ligados de três a três, formando triângulos irregulares como representados na figura abaixo:

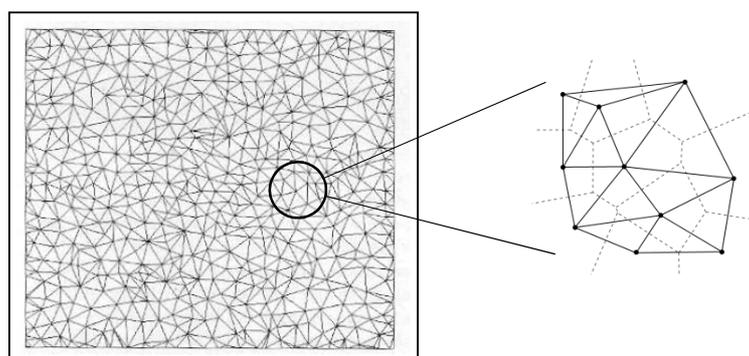


Figura 8. Interpolação por triangulação (adaptada de Maune et. al, 2001; Grohmann, 2015).

Neste tipo de representação mantém-se os valores planimétricos e altimétricos observados, sem nenhuma transformação para uma estrutura intermediária de dados.

Esse modelo possui algumas vantagens e a mais importante delas é que esta rede adapta-se naturalmente à variação da complexidade do terreno de forma que, onde há pouca variação na superfície somente uma pequena quantidade de pontos é amostrada e onde há maior variação, mais dados são usados para a amostragem (Maune et al., 2001).

4.8 Modelagem de dados ambientais

Como instrumento de análise espacial, destaca-se a modelagem de dados ambientais, cujo desenvolvimento se faz requerido no contexto das pesquisas voltadas ao entendimento de fenômenos complexos. Modelos constituem-se basicamente em representações simplificadas da realidade, podendo ser utilizados em diversos campos do conhecimento para diferentes finalidades analíticas (Christofoletti, 1999). Nas geociências, com destaque para a geomorfologia, é usualmente empregado o termo modelagem ambiental a um conjunto de operações lógicas e pressupostos teóricos que vêm a nortear a investigação sobre fenômenos físicos da superfície terrestre. A modelagem utilizada como instrumento na geomorfologia aplicada, vêm a se constituir ferramenta essencial ao entendimento dos sistemas ambientais, assim como à predição de cenários associados à evolução dos processos.

Os sistemas ambientais são entidades espaço-temporais sendo, portanto, dinâmicos. O levantamento de dados é assim “um corte dirigido das condições espaciais e temporais assumidas como vigentes e suficientes para retratar os aspectos ambientais julgados de interesse para a pesquisa em realização” (Meirelles; Almeida; Câmara, 2007).

Dentre as tipologias de modelos, conceituadas com base na sua estrutura, objetivo e na linguagem empregada, Christofoletti (1999) assinala os modelos cartográficos e espaciais, como sendo relacionados aos sistemas de informação geográfica. Nesse contexto, a modelagem ambiental vêm a compor uma estrutura de dados que permite a simulação de processos ambientais, geralmente tendo como plataforma o suporte computacional (Meirelles; Almeida; Câmara, 2007).

5. Caracterização da Área de Estudo

5.1 Localização e Acesso

A área de estudo está localizada no Município de São Pedro a leste da área urbana e a margem esquerda da rodovia SP-191 (São Pedro- Charqueada), compreendida entre as coordenadas 47°52"54.6' W; 22°32"49'S e 47°52"45.7' W; 22°33"46.9' S, perfazendo uma área aproximada de 2 Km² que corresponde a porção das cabeceiras do Córrego do Tucum.

O município de São Pedro dista cerca de 200 km da cidade de São Paulo e seu acesso pode ser feito através das rodovias Anhanguera (SP-330) até o município de Americana, seguindo-se a partir deste pela SP-304, passando pela cidade de Piracicaba. Tem seus limites com os municípios de Itirapina e Torrinha (ao Norte), Charqueada (à Leste), Santa Maria da Serra (à Oeste) e Piracicaba (ao Sul).

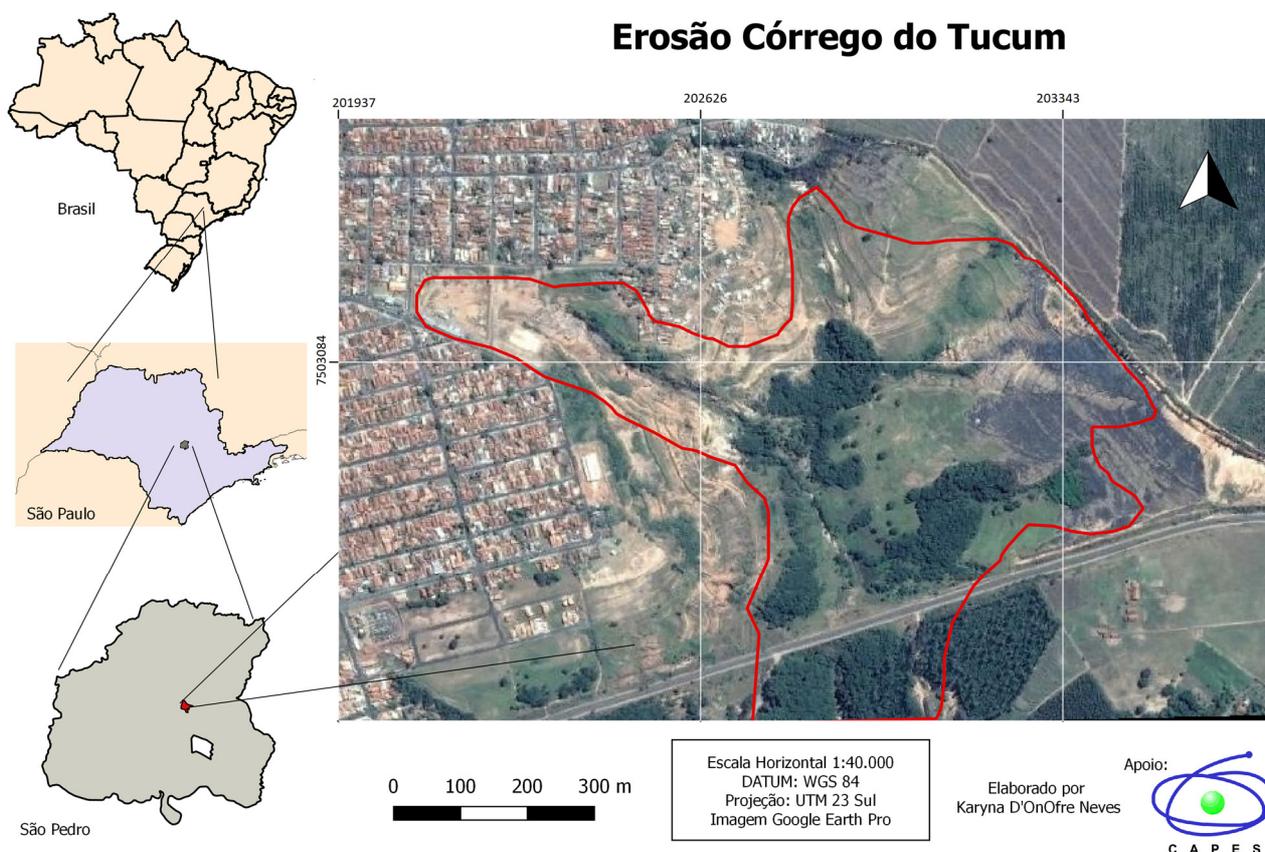


Figura 9: Localização da área de estudo

5.2 Geologia e Geomorfologia

Diversos estudos foram executados na região em diferentes escalas e com objetivos variados como os de Pejon (1992), Santoro (1991), Yamanouth (2003), Silva (2003), Dantas - Ferreira (2004). Geologicamente a área tem como substrato rochoso os arenitos da Formação Pirambóia e Formação Botucatu, de idade Triássica – Jurássica. Os arenitos são de granulação média a fina, de cor branca, vermelha e amarela. Estes arenitos encontram-se recobertos por pacotes de materiais inconsolidados residuais e transportados, com textura predominantemente arenoso e espessuras variando de 1 até 5m. A área insere-se dentro da divisão geomorfológica da depressão periférica, nas proximidades das cuestas basálticas, com um relevo suave sob a forma de colinas com encosta convexas e côncavo-convexas. Na área são encontradas encostas dissecadas e patamares que são produtos do maior grau de resistência de alguns materiais. Sendo que a altitude que variam de 465 a 610 metros.

5.3 Clima

De acordo com a classificação de Koppen (1948) o clima predominante da área estudada é enquadrado como Cwa, representando clima úmido e quente com inverno seco com precipitação média anual de 1200mm. As temperaturas médias do mês mais quente são de aproximadamente 22°C, e do mês mais frio abaixo de 18°C, podendo ser chamado de clima sub-tropical (Yamanouth, 2003).

5.4 Hidrologia

A cabeceira da Bacia do Córrego Tucum tem sua nascente à nordeste da cidade de São Pedro, na confluência dos bairros São Dimas, Recanto das Águas, Raia e Fazenda florestal. Este córrego tem extensão de aproximadamente 5,3km, com percurso no sentido norte-sudeste e desaguando no Ribeirão Araguá, que é parte da bacia do Rio Piracicaba. Apresenta drenagem que varia de média a baixa densidade, com padrões dendrítico e subdendrítico, predominando vales abertos e de fundo chato.

5.5 Aspectos Ambientais

Na Cabeceira do córrego do Tucum ocorrem vários problemas ambientais como assoreamento, feições erosivas, deposição de resíduos sólidos e barreira à expansão urbana. Além do problema da erosão existem problemas como o depósito de resíduos de construção civil, lixo e rejeitos domésticos no local, o que junto com o processo da construção da estrada e da urbanização acelera o processo de erosão; também problemas urbanos como o fluxo clandestino de água e ruas que acompanham a declividade do terreno facilitando o escoamento superficial. Estudos também apontaram na região a presença de erosão subterrânea tipo *pipe*.

É importante citar que, de acordo com Dantas – Ferreira (2004), a vegetação do local encontra-se praticamente destruída e de acordo com o observado, a silvicultura predomina em parte do local, em especial a área que era utilizada anteriormente como lixão. A opção por se cultivar *eucalipto* a princípio foi para ajudar na contenção do material do local e para não inutilizar por completo a área, mas pudemos observar que a camada de solo que recobria os resíduos quase não existe mais, deixando os materiais expostos e impedindo a silvicultura.



Figura 10. Área do antigo lixão.

6. Metodologia

Para avaliação de erosões hídricas, existem dois métodos que são utilizados: um de avaliação qualitativa e outro de avaliação quantitativa, sendo que o primeiro faz uma análise das formas e grau da erosão e o segundo das características próprias daquele sistema.

O método qualitativo apresenta diferentes formas de análise da erosão sem a utilização de valores numéricos. O estudo é feito principalmente através de fotointerpretação de imagens aéreas e da utilização de SIG juntamente com a interpretação das imagens e mapas temáticos gerados e tratados.

O método quantitativo permite uma estimativa numérica da erosão através das estatísticas dos modelos gerados, pode ser realizada in situ ou através de modelos que visam simplificar a realidade do sistema natural.

Neste projeto serão utilizados de ambos os métodos para a obtenção de uma análise mais completa da área, em todos os seus âmbitos.

Segundo Souza (2001), as imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas à uma série de distorções espaciais, não possuem portanto, precisão cartográfica quanto ao posicionamento do objeto, superfície ou fenômenos nela representados. Assim as imagens obtidas precisam ser georreferenciadas.

Esse trabalho se baseará em produtos dos métodos já descritos juntamente com outros dados que se mostrarem pertinentes, composto por revisão bibliográfica, utilização de material cartográfico, processamento de dados em ambiente SIG, confecção de mapas temáticos (hipsometria e declividade) e análise morfométrica seguindo as seguintes etapas a seguir.

6.1 Levantamento de Dados

As primeiras etapas objetivaram os seguintes trabalhos: levantamento bibliográfico, obtenção de dados históricos, tratamento e análise das informações obtidas e a análise da evolução das feições erosivas através das fotografias aéreas previamente obtidas.

O levantamento bibliográfico foi realizado durante todo o projeto através de consultas ao acervo da biblioteca do IGc-USP, a periódicos científicos e outros trabalhos de temas semelhantes através do Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo (SIBi/USP). Foi realizada a leitura de referências dos principais temas explorados neste trabalho, em particular de morfometria, sensoriamento remoto, classificação e análise de feições erosivas e de amostragem de dados digitais.

Para a análise das feições erosivas foram obtidas 6 fotografias aéreas dos anos de 1962 (1:25.000), 1972 (1:25.000), 1978 (1:30.000), 1988 (1:40.000), 1995 (1:25.000) e 2000 (1:30.000) disponibilizadas pelo Laboratório de Geociências da Universidade Federal de São Carlos, e 3 imagens obtidas do Google Earth Pro dos anos de 2007, 2009 e 2011 nas escalas de 1:40.000 cada junto ao Departamento de Geociência da

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC USP, para um trabalho elaborado anteriormente pela autora e cedidos também para o presente trabalho, as quais foram utilizadas para a análise temporal da evolução das feições erosivas. Para tal as imagens foram referenciadas com coordenadas UTM WGS84, fuso 23 Sul: P1 (203683, 7502906), P2 (202177, 7502980), P3 (202125, 7502012), P4 (203777, 7502137), P5 (202940, 7502104).

Após o georreferenciamento, analisou-se as feições ao longo dos anos, imagem à imagem, e foram demarcados polígonos contendo a área total das feições em cada ano, para a realização do cálculo da mesma em cada ano e observar o seu desenvolvimento.

As imagens SRTM foram obtidas diretamente do endereço online do USGS (*United States Geological Survey*) pelo *Earth Explorer*, em que permanecem disponíveis sob a resolução de aproximadamente 30m.

As imagens TanDEM-X de 12 m e de 30 m foram obtidas junto ao Centro Aeroespacial Alemão (DLR) durante um período de licitação aberto no ano de 2016 onde o DLR se propôs a ceder algumas imagens mediante prévia avaliação dos pedidos das mesmas.

O tratamento dos dados digitais consistiu no corte das imagens para dar maior enfoque na área de interesse e também em interpolar o MDE SRTM original para um novo MDE com a resolução melhorada, de 1" (~30m) e cortada para a área de interesse numa escala de 1:12.000 m.

Para a comparação dos modelos gerados por imagens orbitais foram também obtidos dados de elevação através das curvas de nível e dos dados altimétricos de Estação Total cedido por Dener Toledo Mathias.

Nesta etapa seguinte foi analisado e processado o material obtido – imagens orbitais SRTM e TanDEM-X. Os MDEs objetivaram principalmente a estimação do modelo do terreno que mais se aproximava do real, estimação de dados como declividade, altimetria, orientação de vertentes, curvaturas e sombreamento que podem ser utilizados para comparação com fotos históricas da área, podendo avaliar assim seu desenvolvimento para entender a dinâmica da área como um todo.

Os programas computacionais utilizados no tratamento das imagens e dados digitais foram QGIS 2.18 e SAGA GIS 2.3.2.

Os dados SRTM de 30m, TanDEM-X de 30m e 12m foram cortados no QGIS e processados no SAGA, gerados os mapas de declividade, orientação de vertentes e curvaturas planas e de perfil e o relevo sombreado. Para os dados SRTM, após a observação do histograma da orientação de vertentes, optou-se por reamostrar os dados pois as imagens SRTM apresentam apenas valores inteiros e assim é possível

corrigir algum possível pico no valor dos dados e também ruídos. A reamostragem da resolução espacial para 25m foi feita no programa SAGA sendo suficiente para que os dados apresentem valores decimais.

Após a reamostragem foram gerados novos modelos dos mesmos atributos anteriores e optou-se por trabalhar apenas esses dados.

Tanto o modelo digital como os atributos gerados foram processados primeiramente no SAGA através da interpolação por triangulação e depois exportados para um formato suportado pelo QGIS, corrigidos e processados novamente.

Cada arquivo foi exportado em formato suportado para a plataforma QGIS. Os dados foram corrigidos para a melhor visualização, e se estabeleceu um intervalo de -99999 a 0 como o intervalo de valores inválidos e o corte de valores para Máximo e Mínimo, as cotas eram então recalculadas e reclassificadas, para serem tratadas em relação às cores e criação dos mapas temáticos.

As estatísticas e histogramas também foram gerados no programa QGIS após correção dos dados de cada imagem, da forma como descrito anteriormente.

Por último os mesmos passos foram usados para a elaboração do DEM com as cotas extraídas das curvas de nível e das estações totais dos dados cedidos por Dener Mathias. A área total do levantamento resultou em 13648 pontos mensurados por irradiação a partir de 98 estações totais, sendo a área do polígono resultante de 621491 m². Estes foram interpolados no programa Autodesk Land 2004 e resultou na extração de uma malha de pontos contendo as coordenadas X, Y e Z (Mathias, 2016).

Também foram elaborados um mapa hipsométrico, um mapa de declividade, uma figura de localização da área de estudo e outra com destaque das áreas da erosão ao longo dos anos, além de algumas imagens para observação dos processos descritos.

7. Resultados e Discussões

7.1 Análise Multi-temporal das Feições Erosivas

A partir da fotointerpretação das imagens obtidas e da criação de um banco de dados nas plataformas SAGA e QGIS, caracterizadas as feições erosivas e também analisado o processo de uso e ocupação desenvolvido ao redor das erosões como podemos observar nas figuras abaixo: Figura 7 (1962), Figura 8 (1972), Figura 9 (1978), Figura 10 (1988), Figura 11 (1995) e Figura 12 (2000).

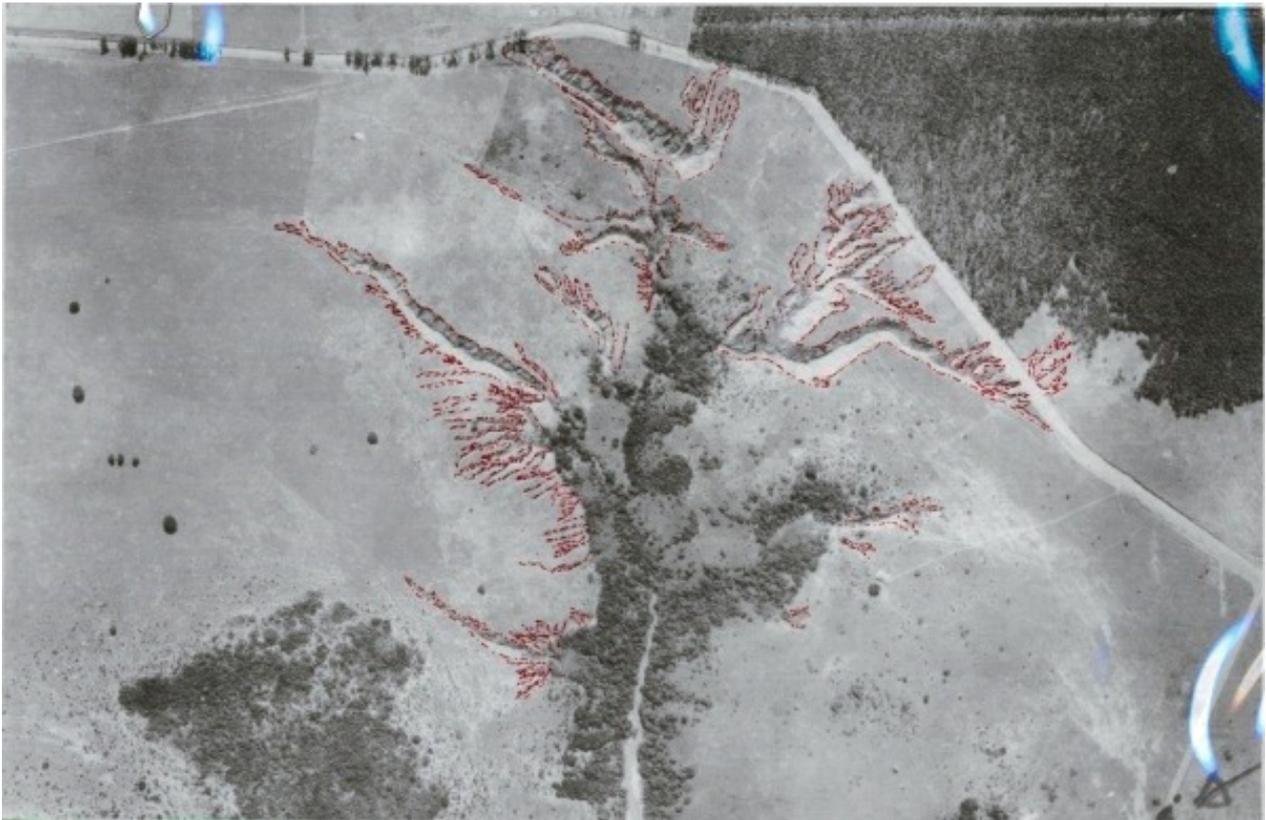


Figura 11: Erosão no córrego do Tucum em 1962

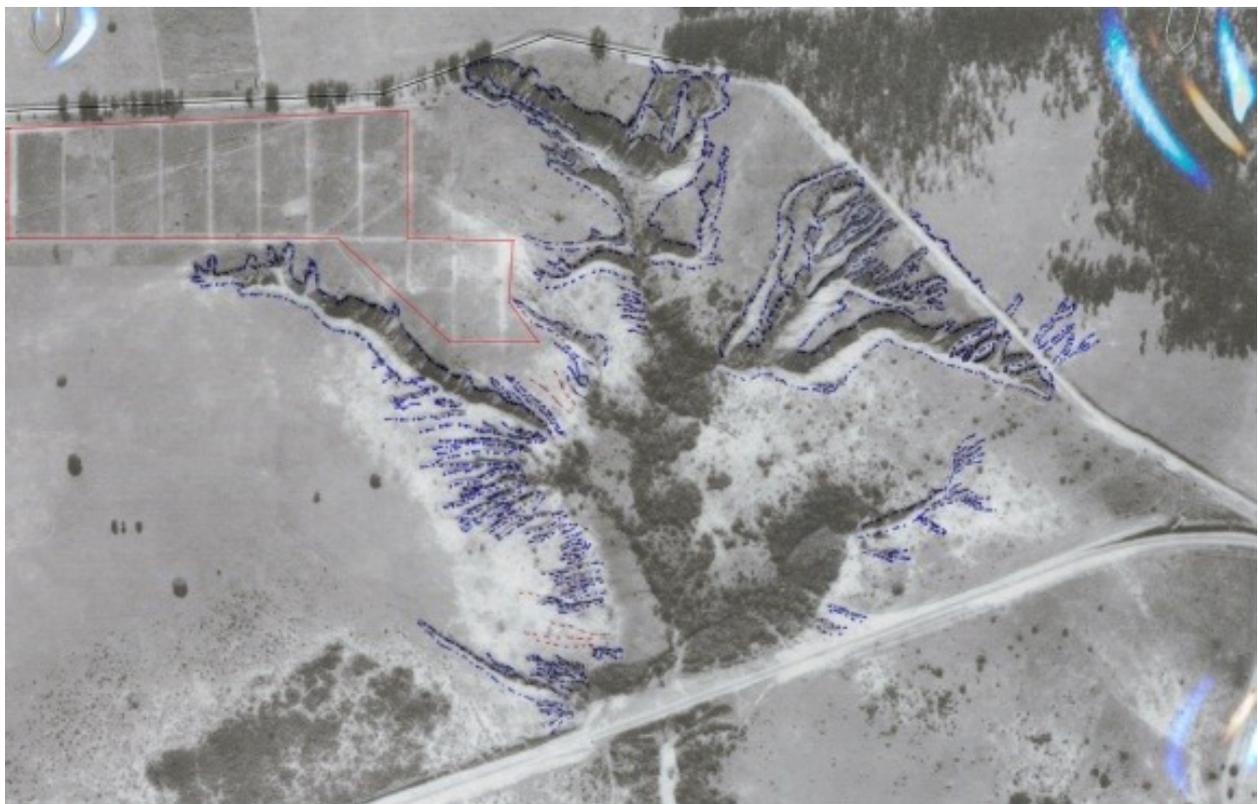


Figura 12: Erosão no córrego do Tucum em 1972.

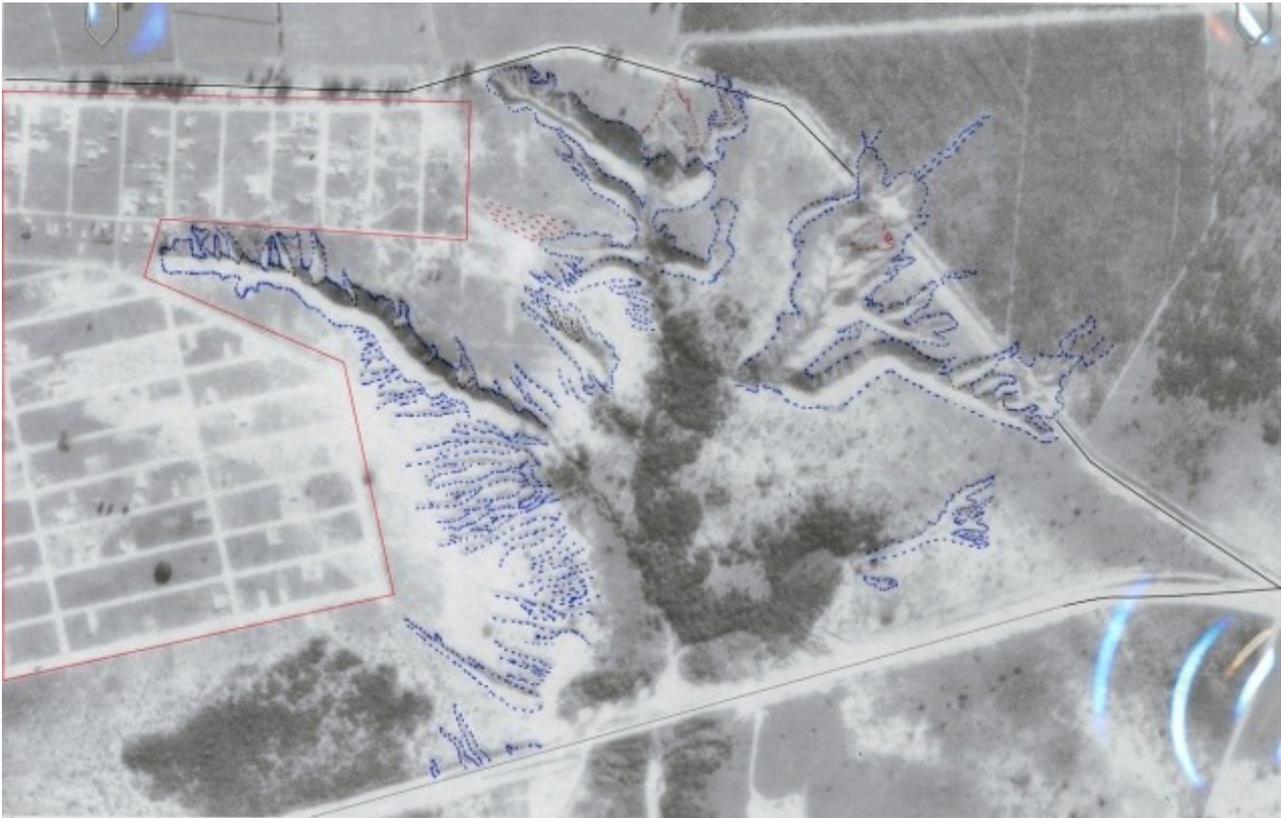


Figura 13: Erosão no córrego do Tucum em 1978.



Figura 14: Erosão no córrego do Tucum em 1988.



Imagem 15: Erosão no córrego do Tucum em 1995.



Imagem 16: Erosão no córrego do Tucum em 2000.

As imagens aéreas mostram claramente o surgimento e desenvolvimento de novas feições erosivas em conjunto com a expansão urbana da área, pois as feições existente anteriormente eram, em sua maioria, estáveis e de origem natural. Na imagem do ano de 1962 observamos uma grande erosão em processo avançado e bastante dinâmico em algumas áreas devido à retirada da vegetação natural e a substituição por pasto, enquanto nas áreas onde a vegetação natural ainda está presente observamos um processo erosivo bem mais estável, e essa área tem permanecido praticamente inalterada.

Nas imagens dos anos de 1972 e 1978 observamos o processo primário de ocupação urbana com a destinação do local para loteamento. Juntamente à área destinada aos loteamentos podemos observar o surgimento de novos processos erosivos de estágio primário no lado oeste da imagem, denominadas sulcos e ravinas. Foi a partir da imagem dessa data que observamos o desenvolvimento da erosão localizada na porção leste da área de estudo, entre os loteamentos e atual área já bem urbanizada e que hoje é a mais problemática e que constantemente apresenta novas feições.

Na imagem do ano de 1988 observamos que algumas das feições já estavam aterradas ou sendo aterradas e também um estágio mais avançado e também o alargamento da erosão em sua porção norte, juntamente às cabeceiras do Córrego do Tucum e o desenvolvimento das áreas urbanas.

E das imagens de 1995 vemos os processos de aterramento da erosão com o intuito de contenção da mesma para o uso urbano. Boa parte da porção norte da erosão já está aterrada mas ainda podemos observar o surgimento de novos processos erosivos nos mesmo locais. O maior problema dos aterramentos é que o material usado para conter as erosões era o mesmo material da área em volta, ou seja, substrato arenoso, sem coesão entre as partículas e assim pouca estabilidade, propiciando novos movimentos de massas de fácil ocorrência.

E por fim na imagem do ano de 2000 observamos boa parte da erosão original aterrada e também com técnicas de cordões de terra para a contenção da água escoada, e muitas dessas áreas já ocupadas. Também observamos vários locais onde a ocupação margeia a erosão, correndo grande risco de desmoronamento. Na porção leste da imagem foram observadas novas feições erosivas após o aterramento. Vale ressaltar que essa mesma área foi utilizada posteriormente com um lixão, que atualmente está desativado, mas apresenta um quadro de erosão laminar, que carrega não somente o solo usado para o aterramento mas também a camada superficial do lixo existente.

Baseado no levantamento feito por Dantas – Ferreira em 2004, elaborou-se uma tabela mostrando os tipos de erosões presentes no local e quantificou-as, como observamos abaixo:

Feições erosivas e Anos	1962	1972	1978	1988	1995	2000
Concentração de Sulcos	07	09	06	02	02	03
Ravinas	03	03	04	11	09	04
Voçorocas	03	03	03	05	05	03
Voçorocas com ravina	03	03	03	03	03	01
Total	16	15	16	21	19	11

Tabela 1: Quantificação das feições erosivas

Tendo a tabela acima como referência, foi elaborada uma nova tabela a partir de novas imagens do local de estudo dos anos de 2007, 2009, 2011 que podemos observar abaixo:



Figura 17: Erosão no córrego do Tucum em 2007.



Figura 18: Erosão no córrego do Tucum em 2009.



Figura 19: Erosão no córrego do Tucum em 2011.

As imagens de satélite foram analisadas e fotointerpretadas, e juntamente foi realizada a caracterização temporal da erosão, assim como nas imagens anteriores.

Em todas as imagens podemos observar a erosão principal que se manteve desde as primeiras fotos, e é a mais estável de toda a área de estudo.

Nos anos de 2007 e 2009 podemos observar uma evolução na área do antigo lixão, onde a cobertura vegetal se desenvolveu, mantando a área mais estável quanto às erosões. Na foto de 2011, à sudeste da erosão principal, margeando atual cemitério e atual bairro São Dimas, podemos observar uma nova feição em estado bastante avançado, e que posteriormente também foi aterrada. Nessa imagem também podemos observar na parte sul dos loteamentos, uma área onde hoje se localiza um cemitério e também ao redor o aparecimento da erosão e sulcos mais recentes.

A imagem abaixo apresenta a área de estudo na data de abril de 2016 e mostra como está atualmente o local de estudo:



Figura 20. Erosão no córrego do Tucum em 2016.

Do ano de 2011 para a imagem mais atual de 2016 percebe-se pouca alteração nas erosões principais, com alguma alteração ao no entorno. A maior diferença nesse caso é em relação a área onde existe o antigo lixão que, assim como já aconteceu anteriormente, a camada de solo que recobre os resíduos está sendo lavada em um tipo

de erosão laminar, expondo os materiais que ali se encontram e colocando em maior risco ainda o córrego do Tucum, podendo contaminá-lo com todos os materiais presentes – sólidos, químicos e compostos provenientes da decomposição, e essa situação é bastante preocupante.

Após essa interpretação foi criada a tabela abaixo, seguindo o exemplo de Dantas – Ferreira (2004), classificando e quantificando as erosões observadas:

Feições erosivas	2007	2009	2011
Concentração de Sulcos	-	2	1
Ravinas	6	6	6
Voçorocas	1	2	3
Voçorocas com ravina	1	1	1
Total	8	11	11

Tabela 2: Quantificação das erosões

É importante observar que, por se tratar de grande dinâmica, somente a erosão principal no Córrego do Tucum sempre se manteve um pouco mais estável do que o seu entorno. Todas as outras feições se alteraram de alguma maneira durante o tempo, seja por ações antrópicas como novas construções ou depósito de lixo, seja por ações naturais como intensos períodos de chuva.

É bastante notável que a expansão urbana registrada nas últimas décadas se deu em total incompatibilidade com as características físico-ambientais que se registram na região. Ao longo dos anos, ações como a expansão da área urbana e posterior impermeabilização parcial ou total do terreno através da construção de vias que, além de serem de concreto e totalmente em descompasso com o natural da área, estão disposta a favor do fluxo preferencial de escoamento devido à declividade da área e aumentando também a velocidade desse escoamento, propiciando condições ainda mais favoráveis para o desenvolvimento das feições erosivas.

Com exceção desta feição que se manteve menos dinâmica do que as outras, citada por Dener (2016) como Córrego do Tucunzinho, todo o local sofreu diversas intervenções para a tentativa de recuperação da área. Como por exemplo a instalação

de dissipadores de energia em vários pontos de escoamento, a construção de cordões de contenção, aterramento das erosões e outras obras de conscientização para o controle da área.

Além de tudo já citado podemos acrescentar ainda o descaso da administração pública para com a população, uma vez que tais impactos afetarão diretamente os moradores próximos às áreas degradadas e a área natural. Tal fato pode ser atribuído à negligência culposa, e às vezes dolosa, da administração pública na gestão ambiental, que visa apenas uma estratégia de mercado quando falamos em planejamento.

Desde o ano de 1986 existem tentativas de contenção da dinâmica e recuperação da área começando com os cordões de terra e/ou pedra junto às cabeceiras das voçorocas mas que foram aplicadas isoladamente e sendo assim pouco eficientes pois todo volume de água contido nesses pontos começou a infiltrar o solo devido a sua estrutura e porosidade e aumentando a dinâmica dos “pipings” (Capri, 1996).

A obra mais notável até então foi realizada no ano de 1991 onde diversas medidas foram implementadas pela prefeitura pois todo o local estava sendo “engolido” aos poucos pelas erosões em verdadeiros “bad-lands” citado por Dener (2016). As obras foram realizadas em parceria com os portos de areia, contudo sem considerar os atributos físicos da área, novamente. As medidas tomadas constituíram na retirada de areia de outros locais do município entulhando-os nas voçorocas e ravinas e também a execução de mais cordões de terraceamento, mas poucas dessas obras existem ainda hoje e poucas foram efetivas, ainda que parcialmente.

Em março de 1995 as intensas chuvas acarretaram em um colapso das obras realizadas até então e foi necessária medidas emergenciais de contenção. Diferentemente da obra anterior que foi realizada sem levar em consideração a rede de drenagem e os pontos divisores de bacia, essa obra demarcou a rede de águas pluviais e após a análise da bacia foram refeitos os cordões de níveis, profundas valas de 2,30m para contenção e uma canaleta de aproximadamente 15m de extensão e 1m de profundidade na cabeceira do canal, mas além de ineficiente esta medida se mostrou na verdade extremamente prejudicial pois começou a carrear muito lixo para o canal (Dantas-Ferreira, 2004). Em muitos momentos também as erosões foram aterradas com resíduos sólidos transformando a área em um verdadeiro lixão municipal, causando altos riscos de contaminação do rio e proliferação de doenças, real negligência do poder público.

Chuvas torrenciais durante alguns meses do ano 2000 romperam mais de uma vez com diversas obras novamente e outras medidas emergenciais foram necessárias. Juntamente com esse acontecimento havia a necessidade de consolidar melhor a área

urbana que estaca se expandido rapidamente e, sendo assim, foram executadas novas obras de aterramento e terraplanagem em conjunto com obras de micro drenagem e desvio de esgotos e canaletas de água. Foram construídos também novos cordões, dissipadores de energia e canaletas de escoamento preferencial. Após esse período uma parte razoável da erosão foi contida e o loteamento avançou em uma dessas localidades, nas fronteiras do bairro Santa Monica, ao norte da erosão.

As obras de urbanização mais recentes realizadas nos arredores das voçorocas incluem mais casas junto à cabeceira do córrego do Tucunzinho, uma creche e um cemitério mostrando que além de não existir nenhuma preocupação com a vida humana ali presente, que corre grandes riscos caso ocorra um grande movimento de massa, também não se preocupa com uma possível contaminação da rede hídrica.

Em relação à evolução morfométrica e também o desenvolvimento da área em metros da erosão, foram elaboradas três imagens agrupando a área das erosões dos anos de 1962, 1972 e 1978, as áreas de 1988, 1995 e do ano de 2000 e por último uma imagem agrupando as áreas dos anos de 2007, 2009 e 2011, todas comparadas com a imagem de fundo do ano de 2017 e mais recente disponível através do Google Earth.

Abaixo podemos observar esse desenvolvimento:

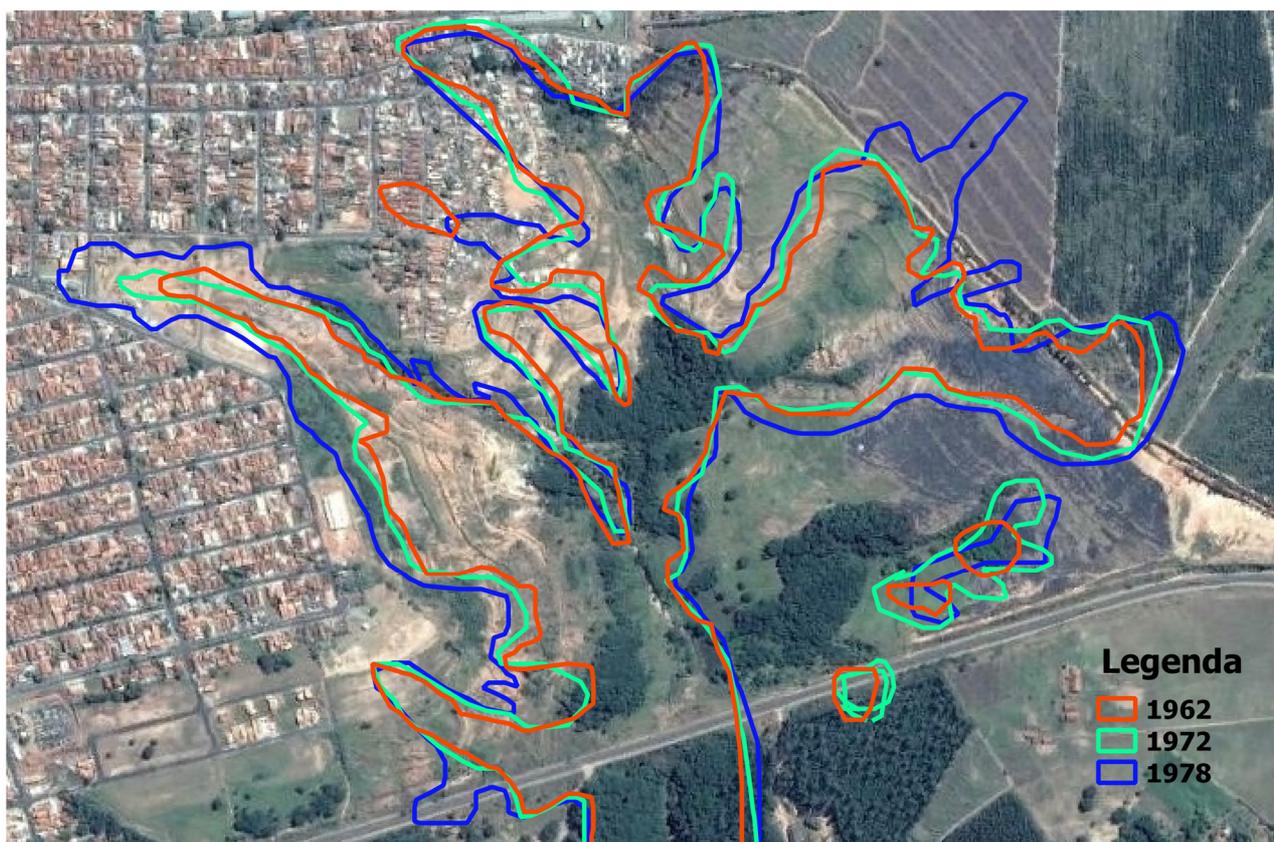


Figura 21: Área das erosões nos anos de 1962, 1972 e 1978.

Na primeira fotografia do ano de 1962 vemos que a erosão presente ali é de ordem natural, devido ao conjunto de atributos físicos do local. Sendo assim a estimativa da área foi realizada através do controno de parte da bacia do córrego Tucum e as feições erosivas presentes em todo o seu entorno. A porção central dela é onde se localiza o leito do rio e mais à jusante até a ao meio do comprimento do rio principal, de primeira ordem, é onde a vegetação se manteve ao longo dos anos, evitando assim que as feições se desenvolvessem tanto nessa localidade.

Foi utilizada esta primeira medição como referência para analisarmos as feições quanto ao seu desenvolvimento. O polígono desta área mediu 502.415 m² e vale observar que apesar de ser uma área bem extensa, essa se mantinha em maior equilíbrio e menor dinâmica e movimentação por conta da vegetação ao redor das feições e pelas condições naturais de todo o entorno que permitiam um bom escoamento fluvial.

Em 1972 o polígono da área mediu 573.175 m² e esse aumentou é referente mais ao alargamento das feições já presentes do que o surgimento de novas.

Em 1798 já podemos observar além do alargamento ainda crescente das feições, o surgimento de novas feições erosivas à nordeste da área de estudo.



Figura 22: Áreas das erosões nos anos de 1988, 1995 e 2000.

Nos anos de 1988 e 1995 ainda observamos um desenvolvimento crescente da área das erosões, medindo o polígono de 88 uma área de 689.531 m² e em 1995 600.724 m². É nítida na evolução das feições ao longo desses anos, mesmo com as intervenções realizadas, a ineficiência da mesma principalmente por motivos como falta de planejamento e descaso público.

Já no polígono do ano de 2000 foi medida a área de 344. 531 m² e podemos observar a partir desse ano que as medidas tomadas começaram a ter maior eficiência. Apesar de serem medidas emergenciais e a área seguir com muitos problemas e diversos locais com uma dinâmica erosiva ainda muito intensa, foi um momento divisor de águas pois boa parte do córrego do Tucum e da erosão original, com sua vegetação foram aterrados para o controle, causando um grande impacto ambiental na área e tornando a mesma um local permanentemente de risco, em graus mais acentuado do que anteriormente. No polígono desta data podemos observar algumas feições destacadas do corpo principal, deixando claro que toda a área ainda estava em intensa dinâmica.

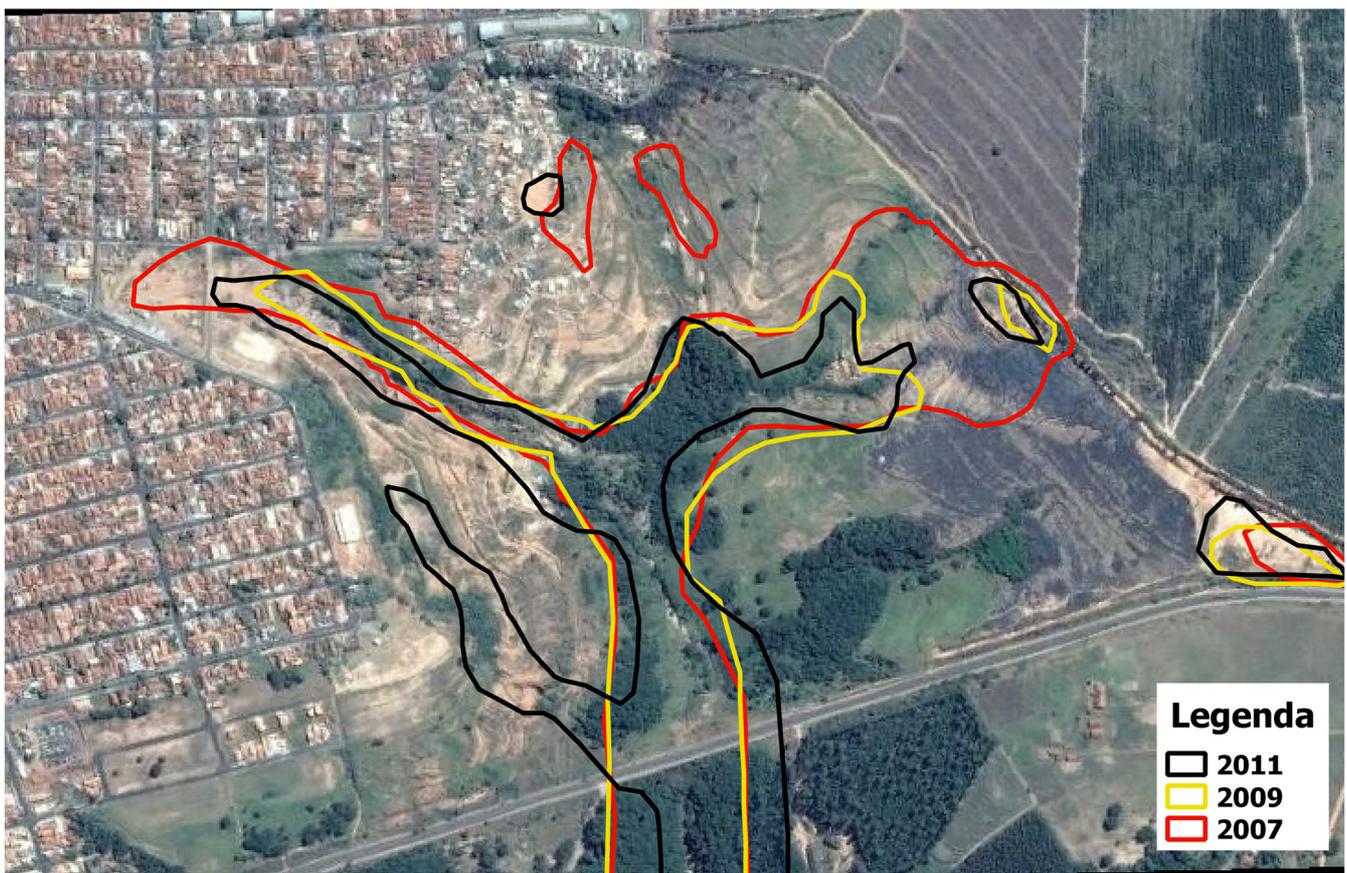


Figura 23: Áreas das erosões nos anos de 2007, 2009 e 2011.

A partir do ano 2000 a área impactada pelas voçorocas foi diminuindo, se desenvolvendo de forma decrescente. Os polígonos dos anos de 2007, 2009 e 2011 mediram respectivamente: 318. 135 m², 265.592 m² e 228. 773 m², sendo que na imagem do ano de 2011 podemos observar uma erosão de grande proporção na porção sudeste da bacia, formando praticamente um novo braço como a erosão do córrego do Tucunzinho. É bastante comum ao longo de uma pequena quantidade de tempo como dias ou até ao longo de algumas semanas grandes voçorocas se desenvolverem na área, principalmente nos períodos mais chuvosos, e atualmente apesar de não existir nenhuma nova feição de grande proporção (nem esta do ano de 2011, que foi aterrada logo depois), o local ainda está em constante dinâmica das massas, ainda sendo considerada uma área de risco.

Através das imagens disponíveis no Google Earth foram medidos os polígonos da área das erosões dos anos de 2016 e 2017, que mediram respectivamente 187.551 m² e 173. 488 m² e a área segue um pouco mais estável com exceção da porção sudeste já explanada.

Abaixo podemos ver uma tabela contendo os valores da área afetada pelas erosões de todos os anos analisados:

ANO	ÁREA em m²
1962	502.415 m ²
1972	571.175 m ²
1978	619.448 m ²
1988	689.531 m ²
1995	600.724 m ²
2000	344.531 m ²
2007	318.135 m ²
2009	265.592 m ²
2011	228.773 m ²
2016	187.551 m ²
2017	173. 488 m ²

Tabela 3: Valores das áreas afetadas pelas feições erosivas em cada ano analisado

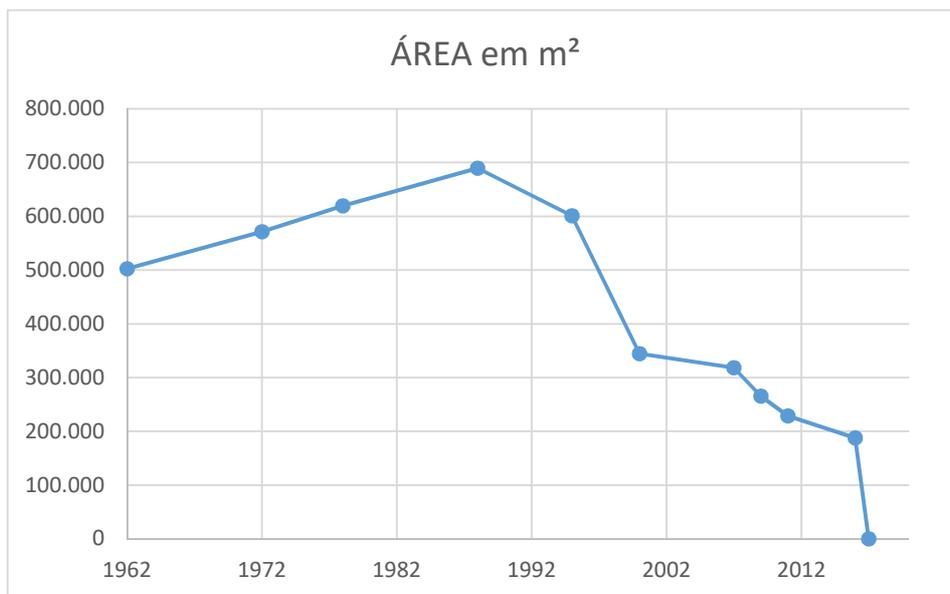


Figura 24: Gráfico da evolução da área da erosão em m²

Apesar dos números apontarem algo que parece ser positivo, que é a diminuição da área afetada pela erosão como podemos ver no gráfico a cima, com o histórico de acontecimentos e intervenções da área podemos ver que a situação não é de forma alguma positiva devido quando consideramos os diversos impactos já causados, tanto para dinâmica ambiental e toda a contaminação que já aconteceu, quanto em relação ao impacto social para a população que vive em constante risco.

Se faz necessário reconhecer que, dados os fatos e o progresso contínuo da urbanização, muito do que foi feito se mostrou efetivo e de extrema importância para a habitação das pessoas no local como é hoje, mas ainda cabe a reflexão em relação ao custo final de todo o procedimento em relação ao benefício final, desde o custo em dinheiro para as constantes intervenções até o custo socioambiental ao longo de todo o tempo.

7.2 SRTM 30m reamostrado

Os dados SRTM foram reamostrados no SAGA para a resolução de 25m utilizando da interpolação bilinear. Podemos observar abaixo nos histogramas que dizem respeito ao modelo digital do aspecto, a nova distribuição dos valores.

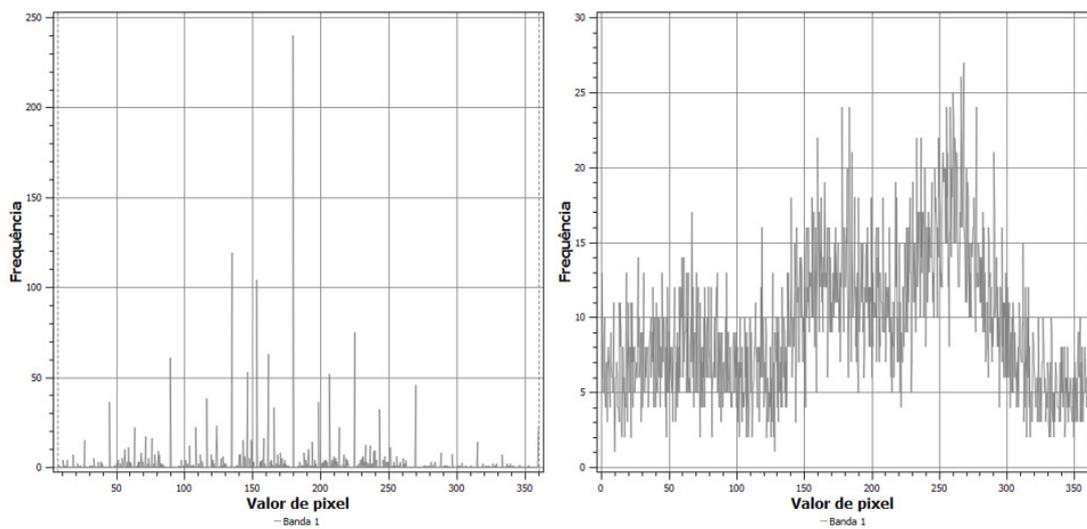


Figura 25. Histograma dos modelos digitais do aspecto do SRTM 30m e SRTM amostrado com 25m, respectivamente.

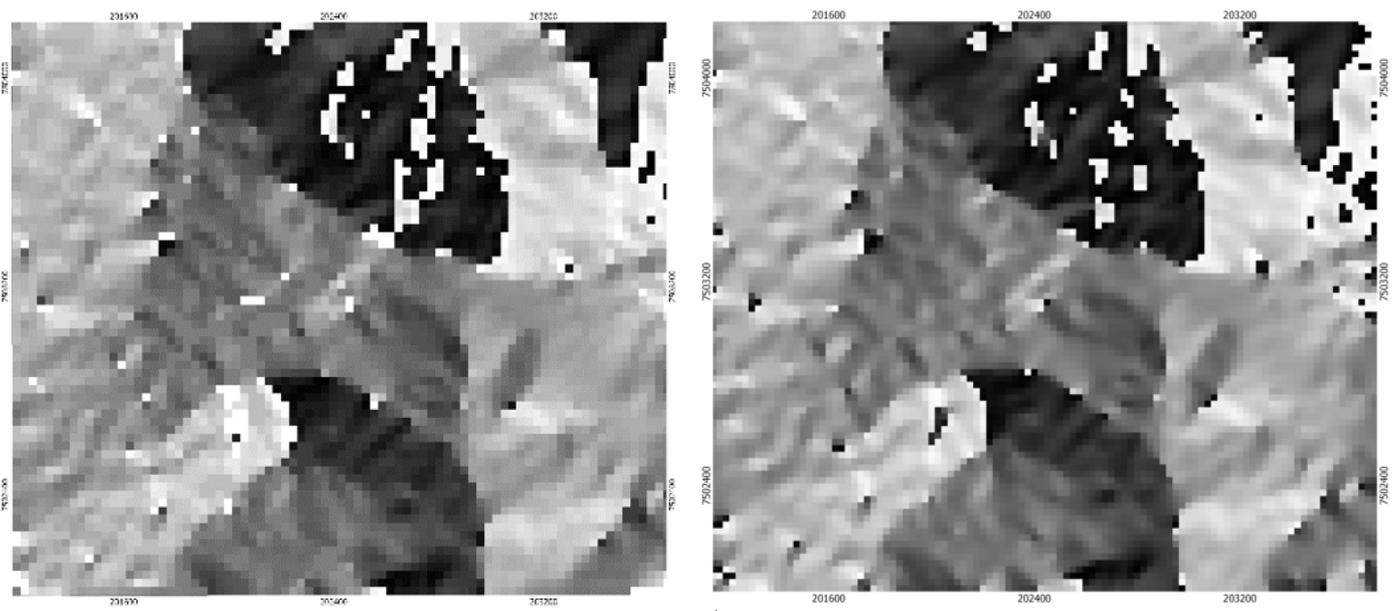


Figura 26: Modelo digital de orientação de vertentes SRTM 30m e SRTM 25m

Podemos observar na comparação entre os histogramas e a orientação de vertentes do SRTM antes e depois de ter os dados amostrados grande diferença tanto na porção de pontos cotados e interpolados como também na melhor visualização da imagem, com menos pixels e uma cobertura mais homogênea.

É possível reamostrar os dados com menos células e obter uma imagem bem tratada, de cobertura bem homogênea e visualmente melhor mas somente para observação pois, como não se trata de uma representação real da área, não teria utilidade nem para análise ótica, e por isso existe um limite de intervenções de reamostragem dos dados.

Após essa observação optou-se por usar apenas os dados reamostrados do SRTM, pois teria maior relevância para o presente trabalho. A reamostragem realizada modificou levemente as características visuais da imagem mas sem distorcê-la, proporcionando nesse caso uma imagem ainda melhor para análise visual e dados quantitativos mais representativos, sem grandes picos ou ruídos.

Sendo assim, abaixo podemos observar os mapas de hipsometria e de declividade elaborados com os dados reamostrados, juntamente dos histogramas e estatísticas dos mesmos:

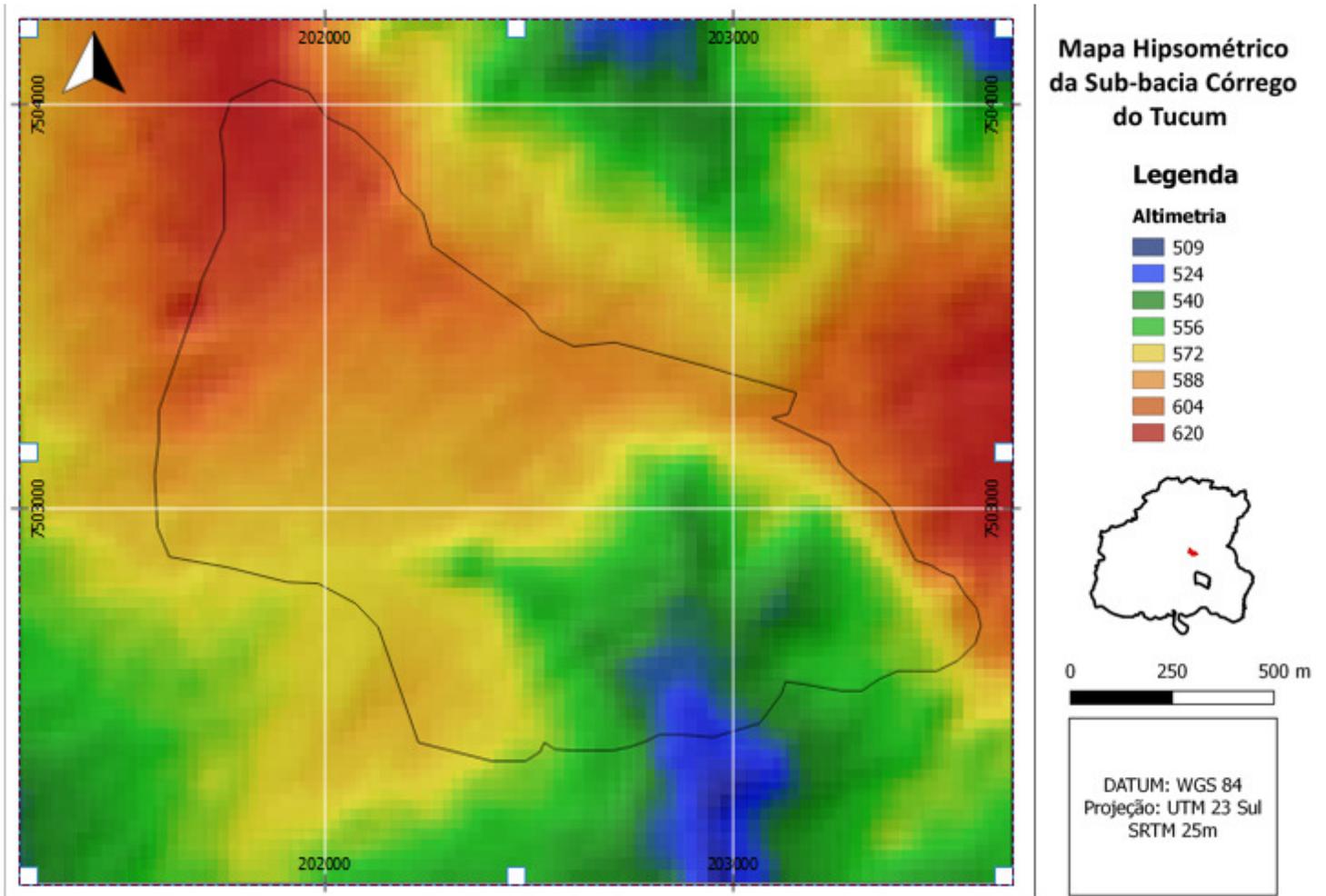
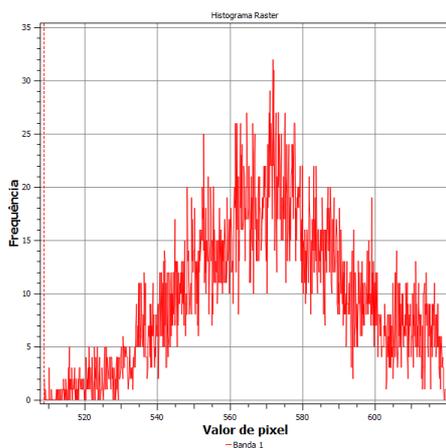


Figura 27: Mapa Hipsométrico SRTM 25m.



DEM SRTM 30m Reamostrado	
MAX	618.87
MEAN	578.27
MIN	510.73
STDDEV	20.74

Figura 28: Histograma e estatísticas dos dados hipsométricos SRTM 25m.

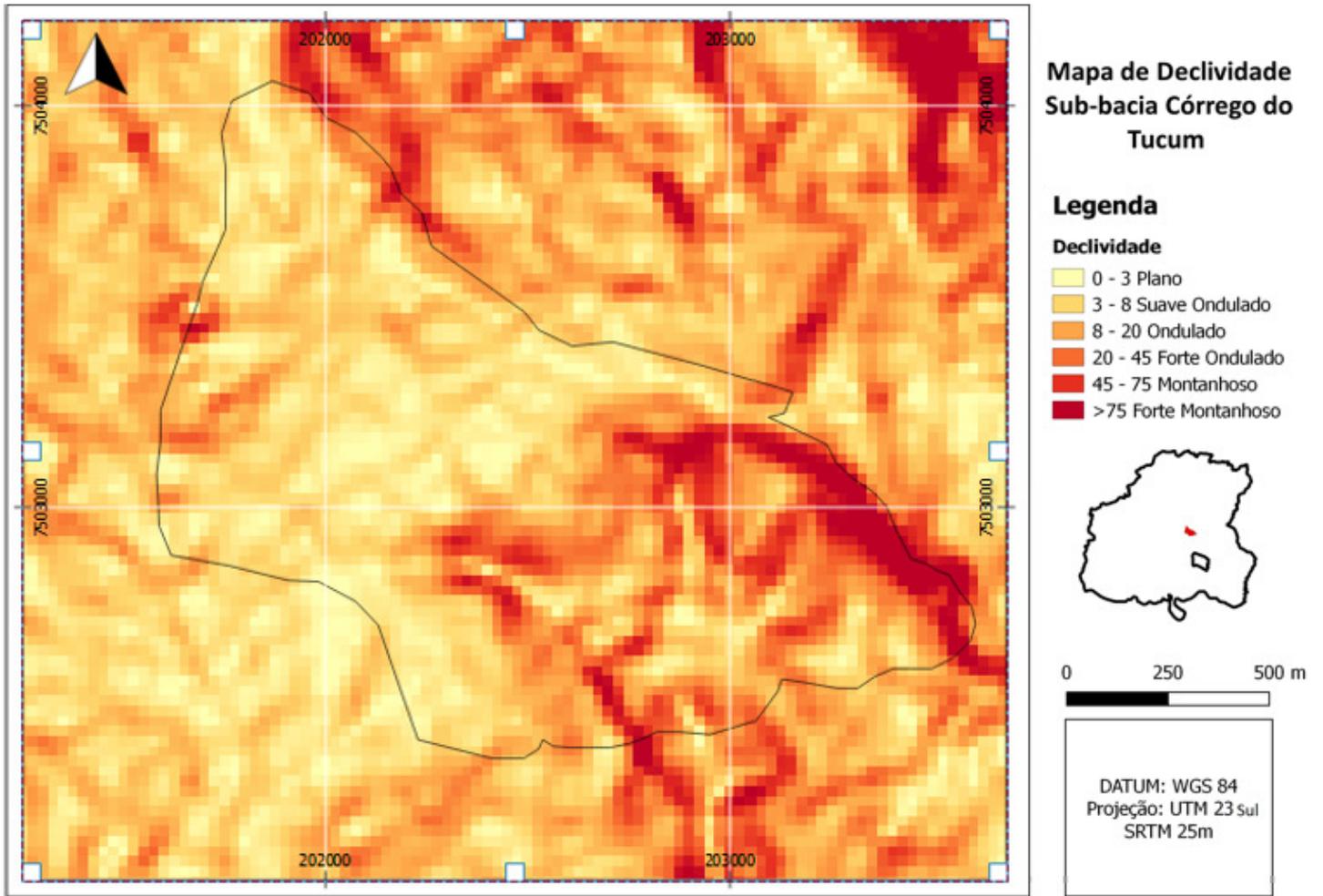
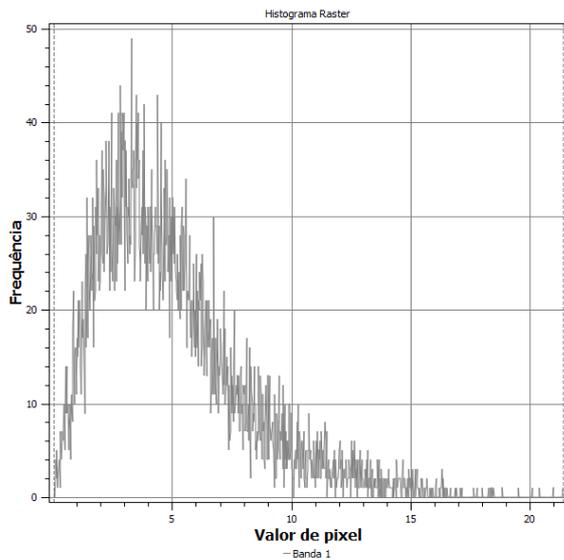


Figura 29: Mapa de Declividade SRTM 25m



Slope SRTM 25m	
MAX	20.51
MEAN	4.53
MIN	0
STDDEV	3.33

Figura 30: Histograma e estatística do mapa hipsométrico SRTM 25m.

Uma observação importante em relação a todos os mapas de hipsometria e declividade dos dados SRTM e TanDEM-X, tanto de 12m quanto de 30m, é em relação às estatísticas e histogramas que foram todos calculados para a área de interesse demonstrada nos mapas mas, devido ao tamanho da área de estudo, optou-se pela representação da mesma indicando nos mapas a delimitação da sub-bacia do Córrego do Tucum e não extraíndo a forma do mapa, como é mais comumente feito. Assim se possibilitou a melhor visualização e melhor representação matemática possível.

A hipsometria de declividade geradas com SRTM reamostrado para 25m acentuou a amplitude dos dados, e especialmente com esses dados foi observado o grau de detalhamento da imagem e se essa seria pertinente para estudos e avaliações ambientais em áreas de grande escala, como essa.

Foram encontrados valores de altitude mínima de 510m até a máxima de 619m, com declividade representada em graus nos valores mínimo de 0 e máximo de 22 graus, caracterizando uma declividade média.

As imagens de curvaturas para cada modelo de elevação ou modelo de terreno foram geradas no SAGA para observação da distribuição dos valores para os parâmetros das curvaturas horizontal e vertical e as estatísticas de ambos.

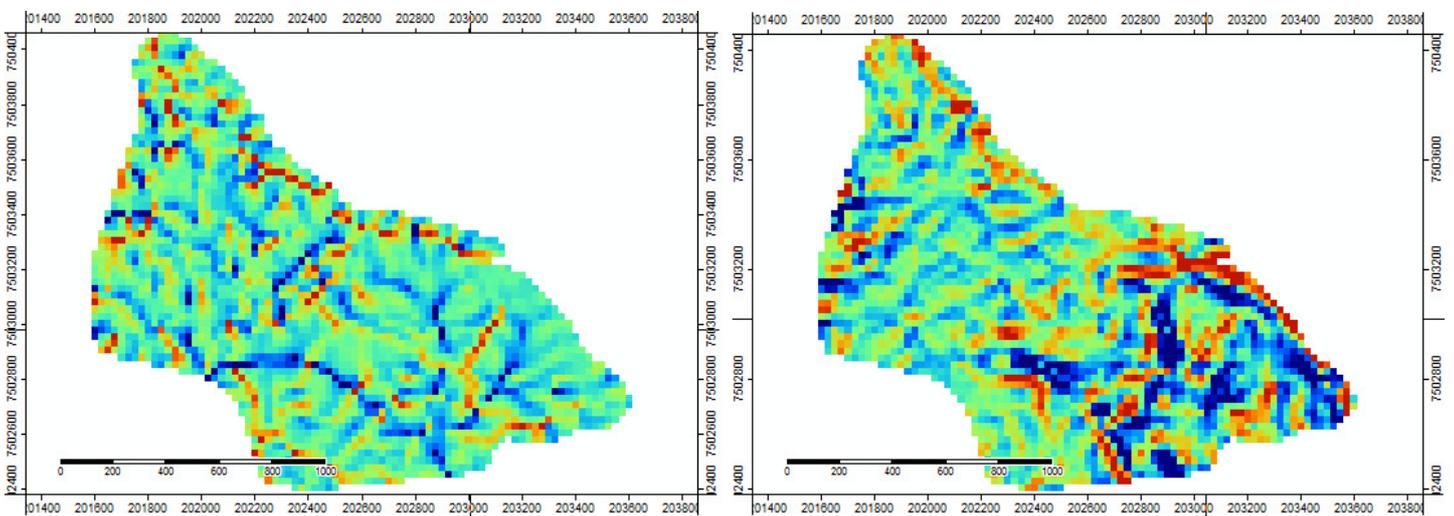


Figura 31. Mapa de curvaturas horizontal e vertical SRTM 25m.

Abaixo podemos observar também o histograma de distribuição dos dados de ambas as curvaturas e também os dados estatísticos:

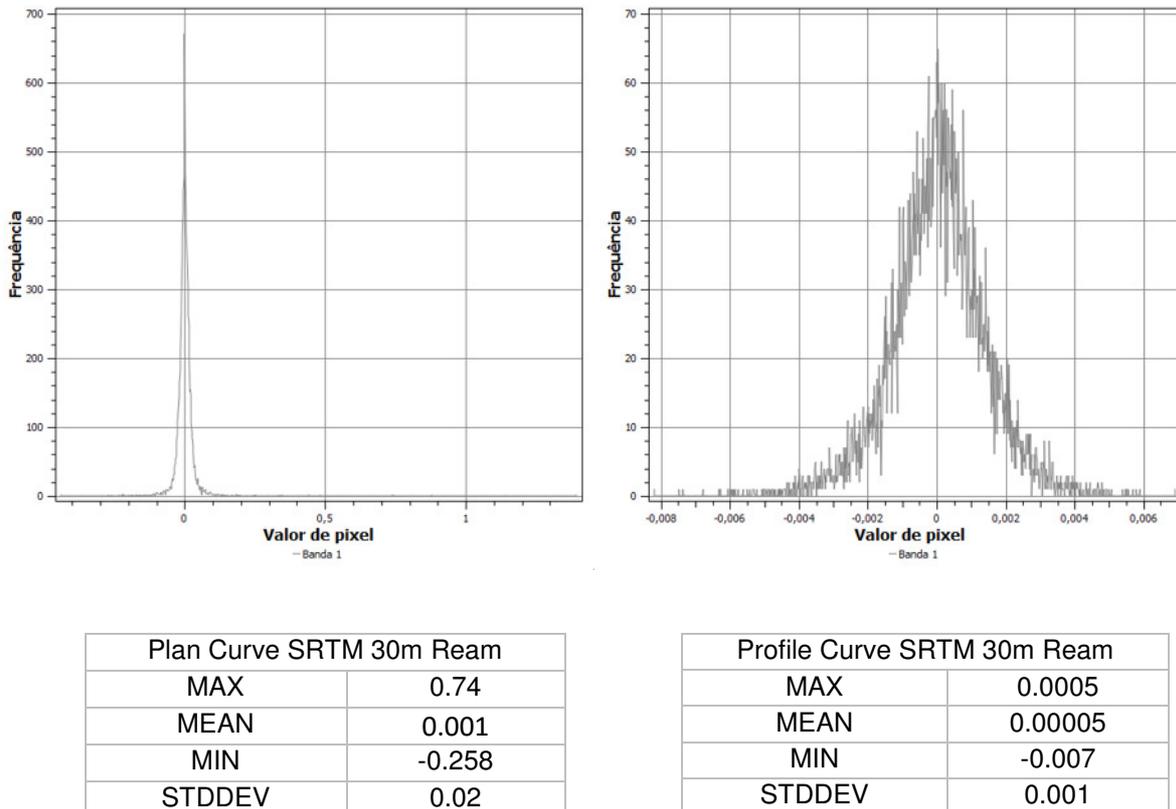


Figura 32. Histogramas e estatísticas das curvaturas horizontal e vertical SRTM 25m, respectivamente

Essas mapas estão diretamente relacionados à superfície do terreno, possibilitando identificar se estas possuem formas côncavas ou convexas em relação a uma superfície horizontal e vertical do terreno. As cores quentes representam os menores valores e as cores frias os maiores valores.

Para real análise das curvaturas se faz necessário a normalização das distâncias correspondentes na superfície do terreno, dependentes da declividade e da orientação da vertente. Tal cuidado reproduz com maior fidelidade a natureza da variável pois a convexidade ou concavidade da superfície deve estar independente da declividade, havendo, em ambos os casos, superfícies inclinadas ou planas. (Doornkamp & King, 1971), mas para o presente trabalho nos atentaremos apenas na análise ótica.

7.3 TanDEM-X 30m e 12m

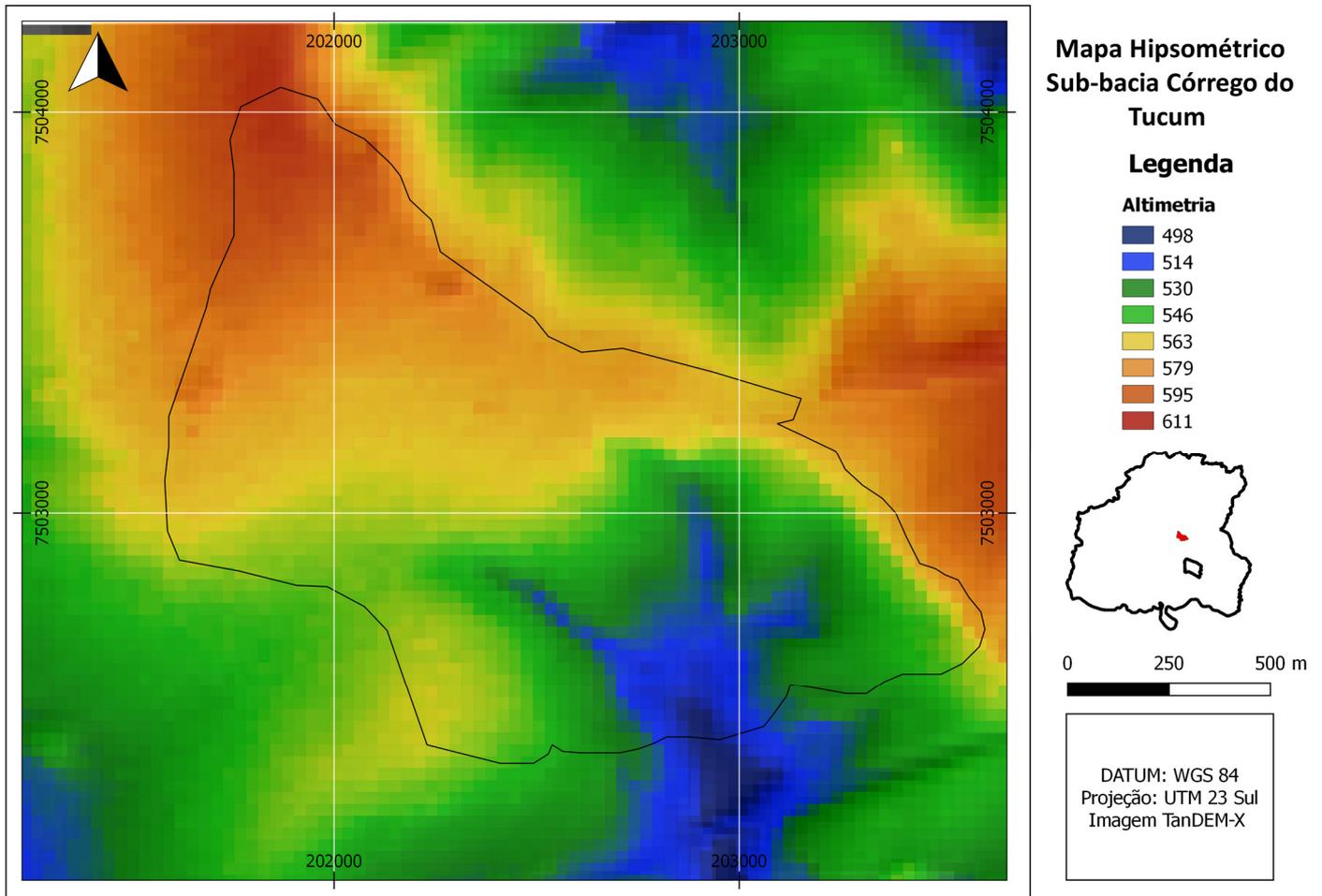


Figura 33: Mapa Hipsométrico TanDEM-X 30m.

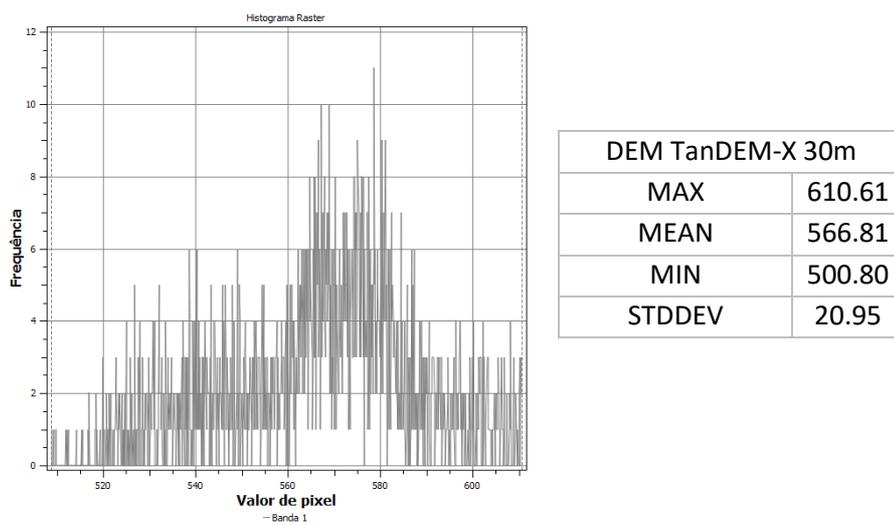


Figura 34: Histograma e estatística do mapa hipsométrico TanDEM-X 30m.

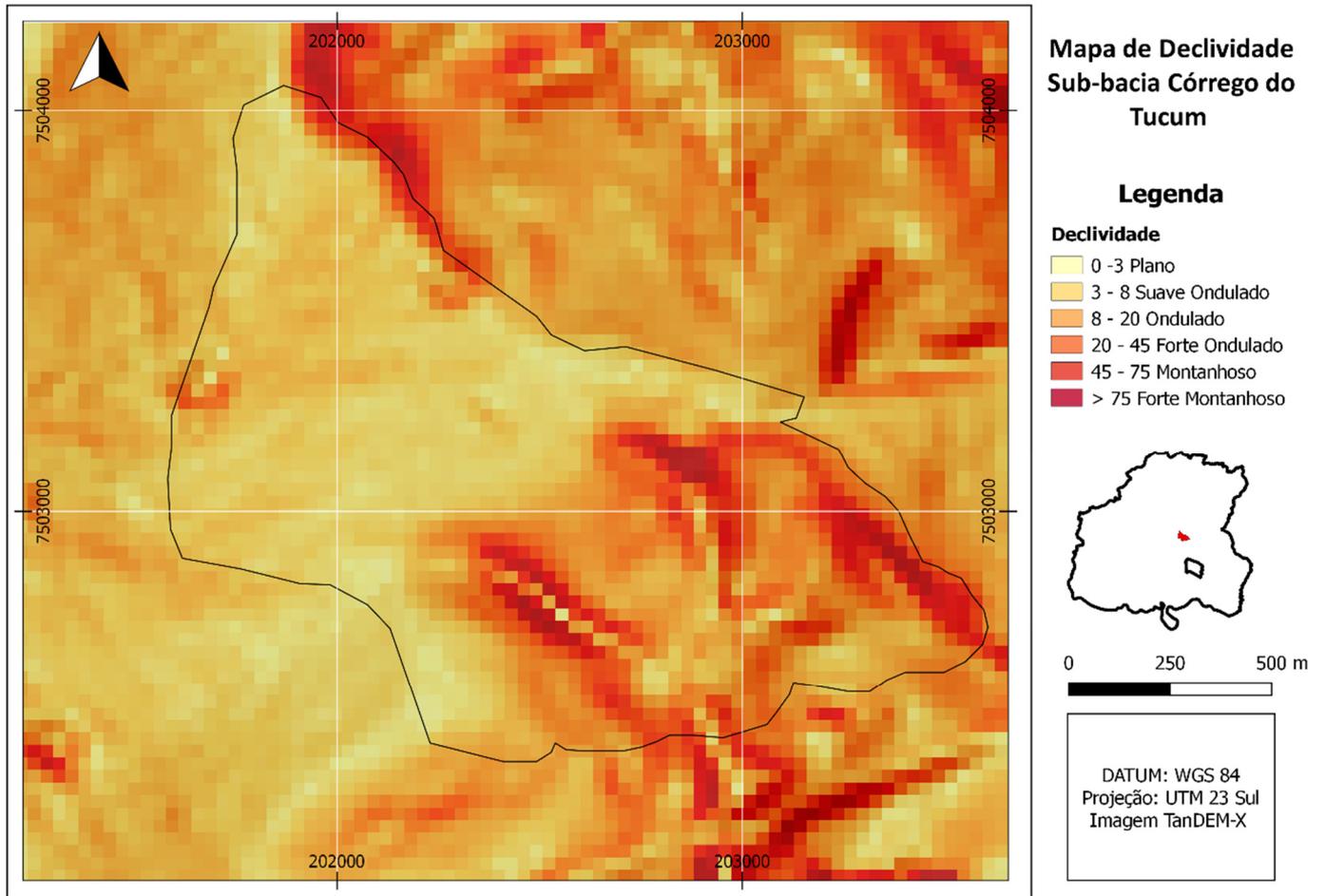


Figura 35. Mapa de Declividade TanDEM-X 30m.

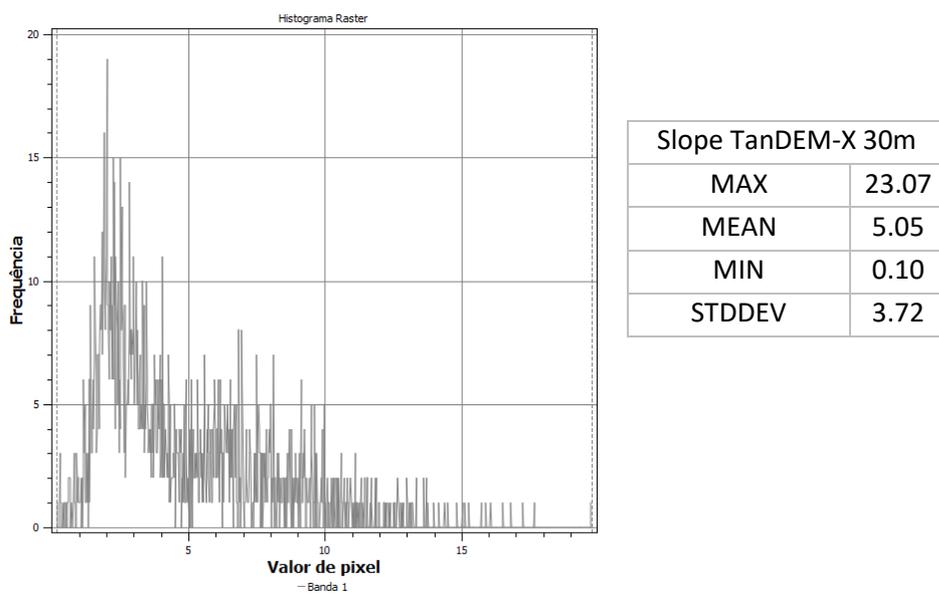


Figura 36. Histograma e estatística do mapa de declividade TanDEM-X 30m

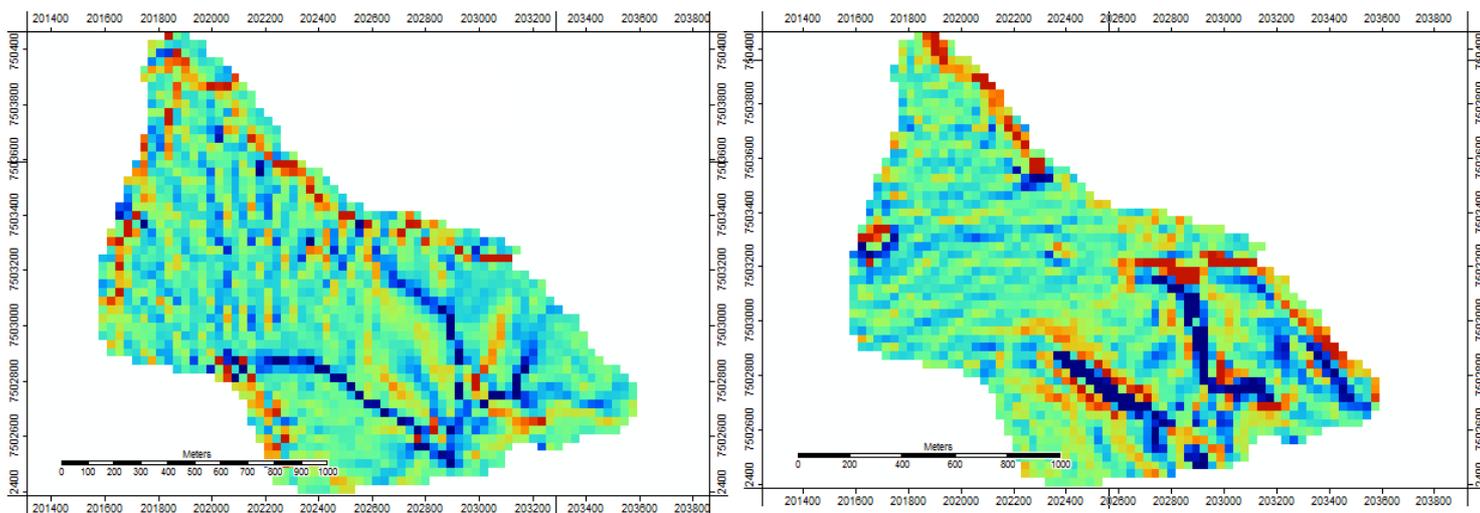
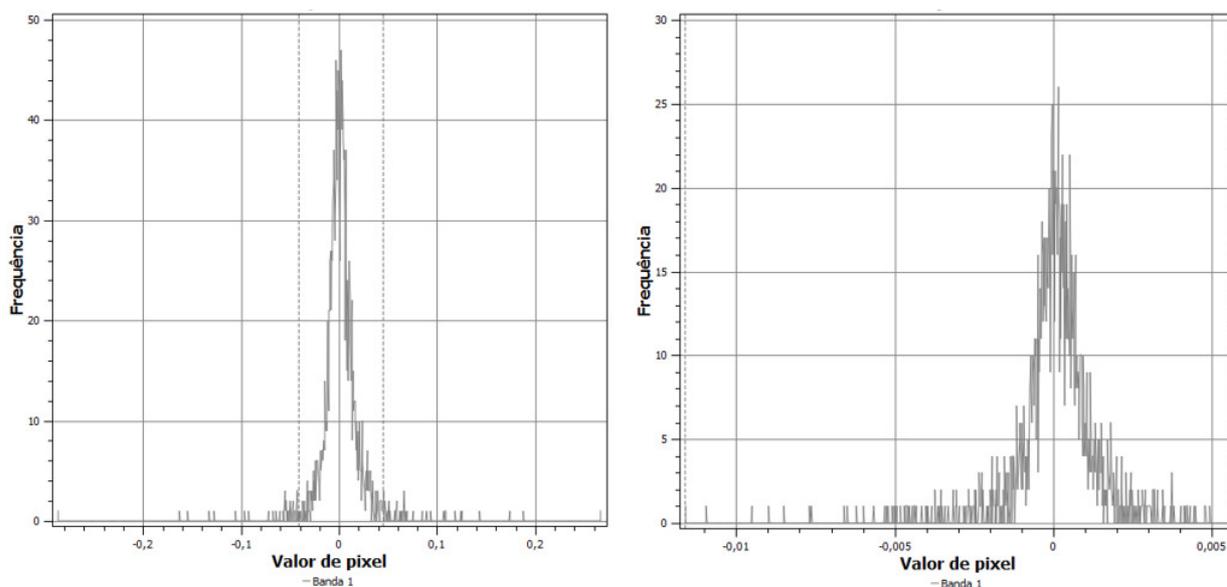


Figura 37. Mapa de curvaturas horizontal e vertical TanDEM-X 30m.



Plan Curv TanDEM-X 30m	
MAX	1.24
MEAN	-0.0003
MIN	-2.54
STDDEV	0.07

Profile Curv TanDEM-X 30m	
MAX	0.01
MEAN	0.00007
MIN	-0.01
STDDEV	0.002

Figura 38. Histogramas e estatísticas das curvaturas vertical e horizontal TanDEM-X 30m.

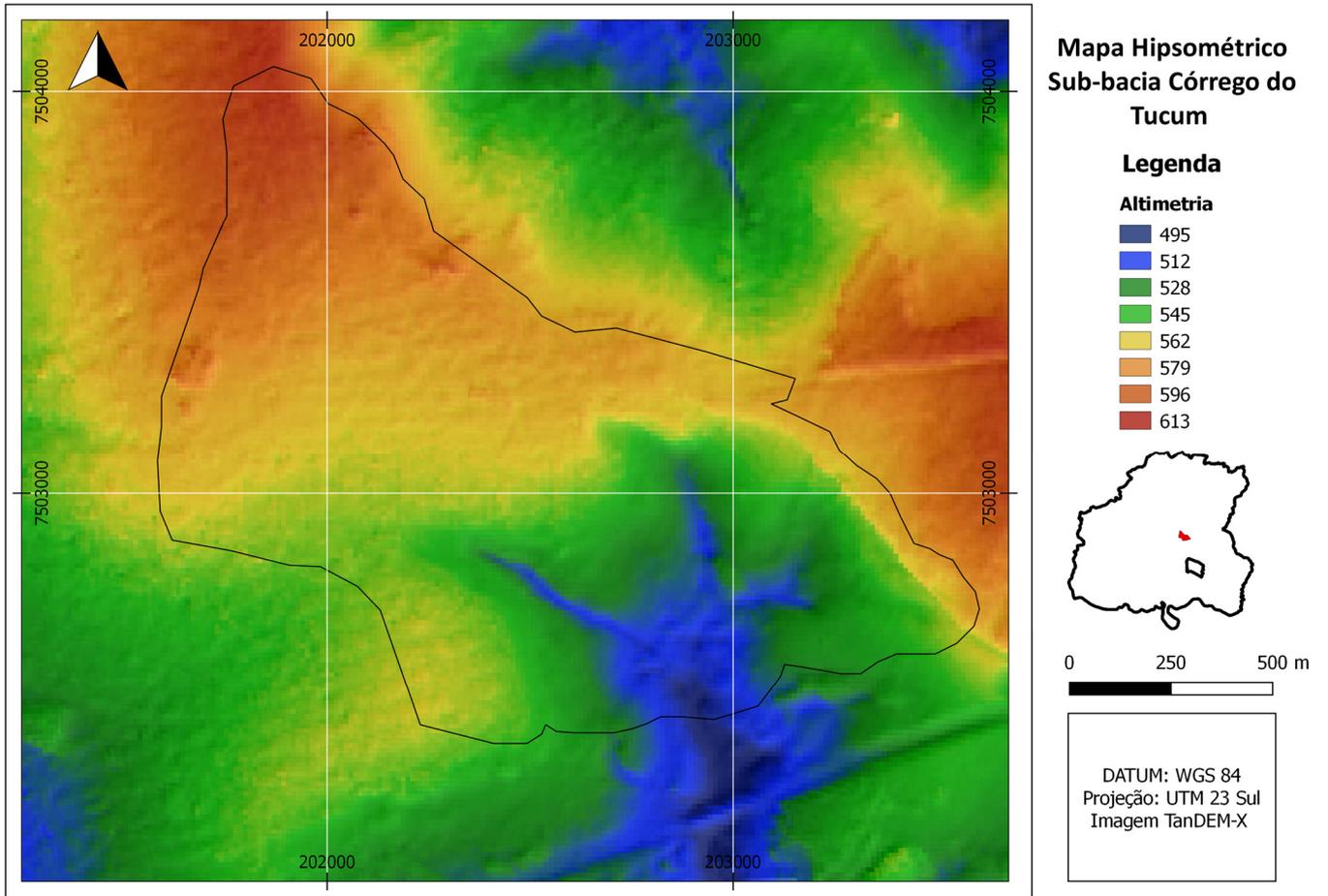


Figura 39: Mapa Hipsométrico TanDEM-X 12m.

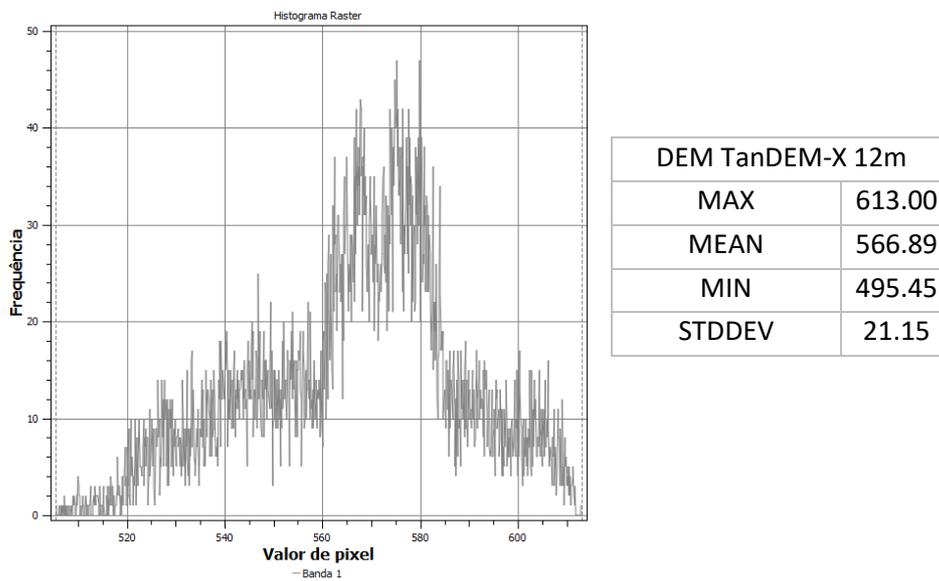


Figura 40: Histograma e estatística do mapa hipsométrico TanDEM-X 12m

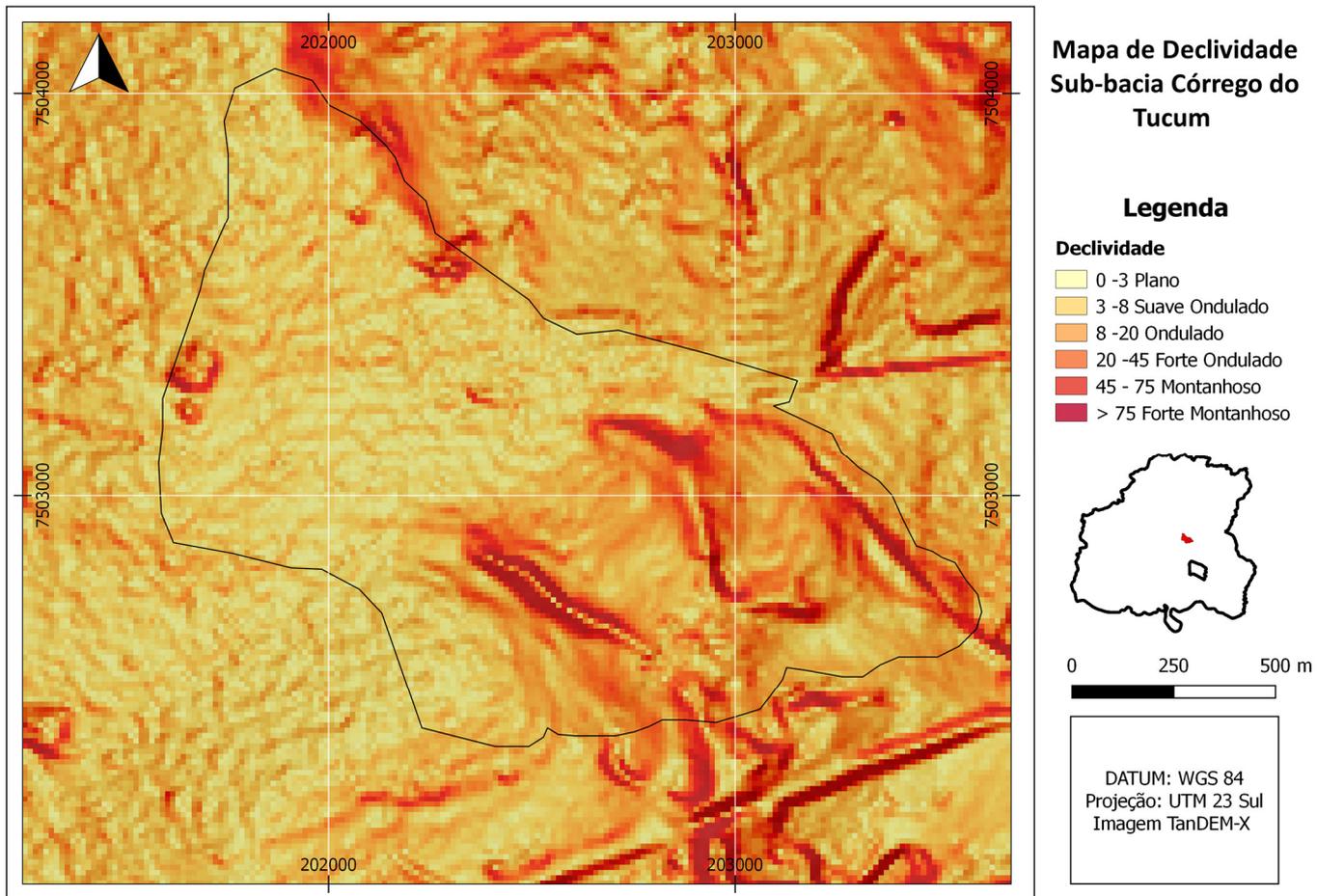


Figura 41: Mapa de Declividade TanDEM-X 12m.

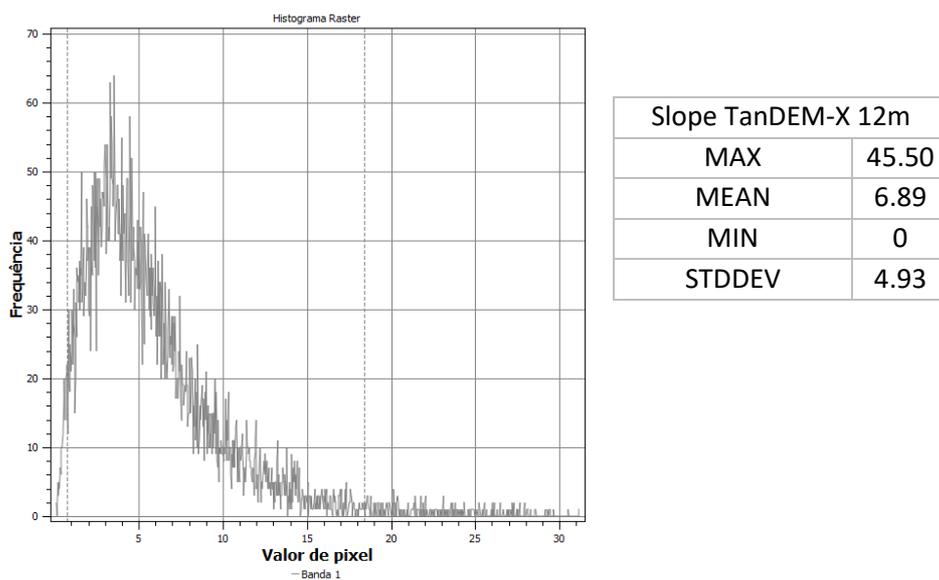


Figura 42: Histograma e estatística do mapa de declividade TanDem-X 12m

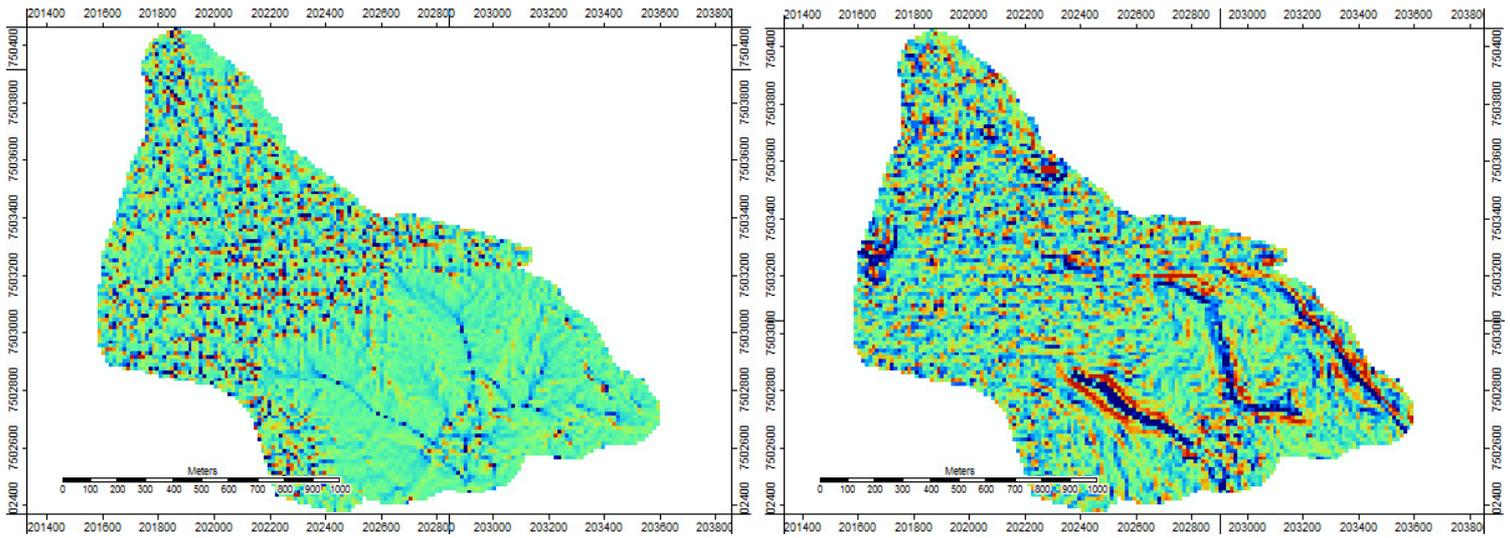
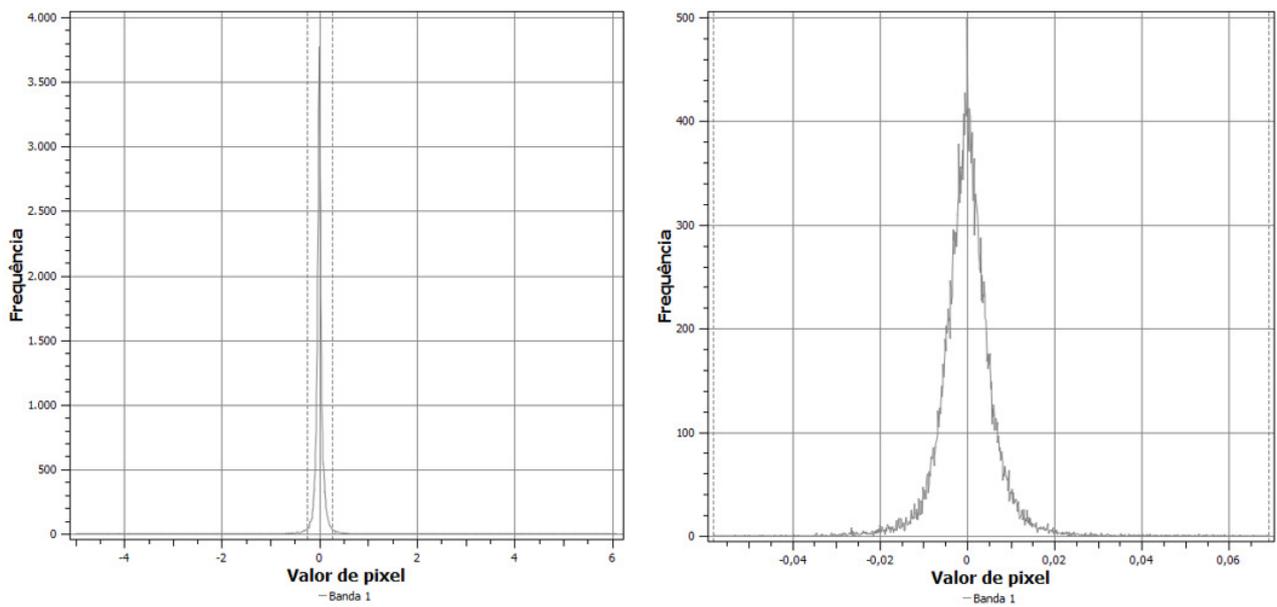


Figura 43: Mapa de curvaturas horizontal e vertical TanDEM-X 12m.



Plan Curv TanDEM-X 12m	
MAX	2.71
MEAN	0.0005
MIN	-4.24
STDDEV	0.13

Profile Curv TanDEM-X 12m	
MAX	8.34
MEAN	0.004
MIN	-3.33
STDDEV	0.266

Figura 44. Histogramas e estatísticas das curvaturas horizontal e vertical do TanDEM-X 12m

Para os modelos gerados a partir dos dados TanDEM-X, tanto de 30m de resolução, quanto de 12m de resolução, encontramos maior detalhamento tanto nos dados matemáticos como na análise visual dos mapas.

A altimetria nesses mapas variou de 508 m a 610 m no modelo do TanDEM-X de 30m, e no TanDEM-X de resolução 12m variou de 505 m a 613 m. Só neste exemplo já podemos observar que o modelo de maior resolução apresenta também maior precisão e amplitude dos dados altimétricos e, se comparado os dois modelos de mesma resolução, TanDEM-X de 30m e SRTM de 30m, podemos fazer a mesma comparação sendo o MDE TanDEM-X de maior precisão de dados matemáticos e visuais.

O mesmo podemos observar, e forma ainda mais acentuada, nos mapas de declividade onde no modelo do TanDEM-X de resolução espacial 12m apresentou uma amplitude de dados muito maior com a máxima de 45,5° enquanto o TanDEM-X de 30m aponta uma declividade máxima de 23°.

Outra diferença visual grande entre os modelos gerados a partir do SRTM e do TanDEM-X foi a presença da estrada que, nos dados TanDEM-X se mostra muito nítida, enquanto na SRTM praticamente não é possível observar. Fazendo uma análise conjunta com a fotointerpretação das imagens aéreas, podemos observar que na imagem do ano 2000 a cobertura vegetal, principalmente ao redor da estrada, parece menos densa do que nas imagens dos posteriores.

A missão SRTM foi lançada nos ano 2000 e imageou exatamente aquele momento da paisagem e, devido a sua resolução, provavelmente os dados de elevação não apresentaram tanta variação naquele local.

Já a missão TanDEM-X é de 2010 e de resolução de imagem muito superior ao SRTM. Juntamente com o fator da vegetação hoje ser mais densa ao redor da estrada, como podemos ver nas imagens de satélite analisadas, os dados de elevação se mostraram mais precisos e a estrada aparece bem delimitada nas imagens.

7.4 MDT Interpolado

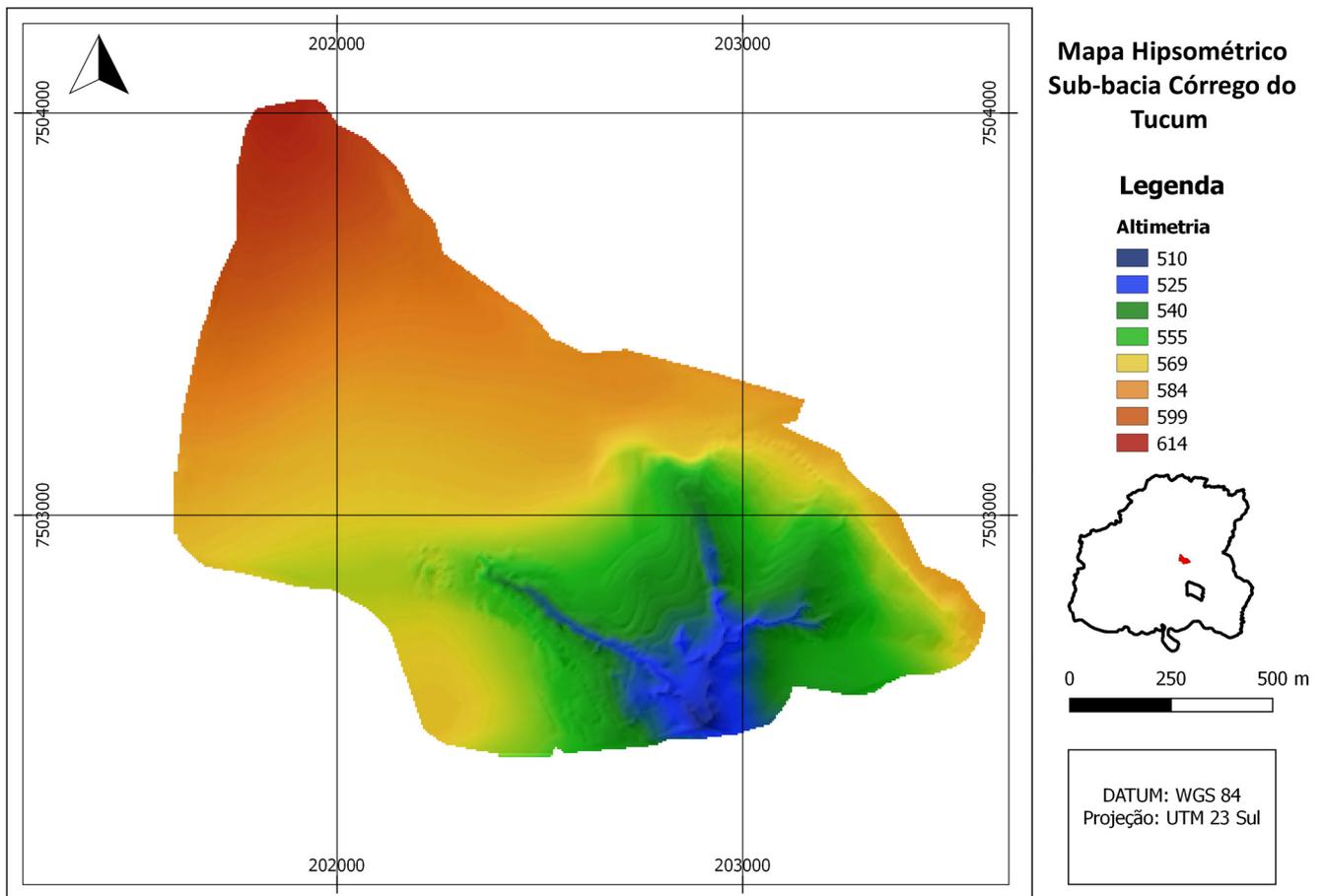
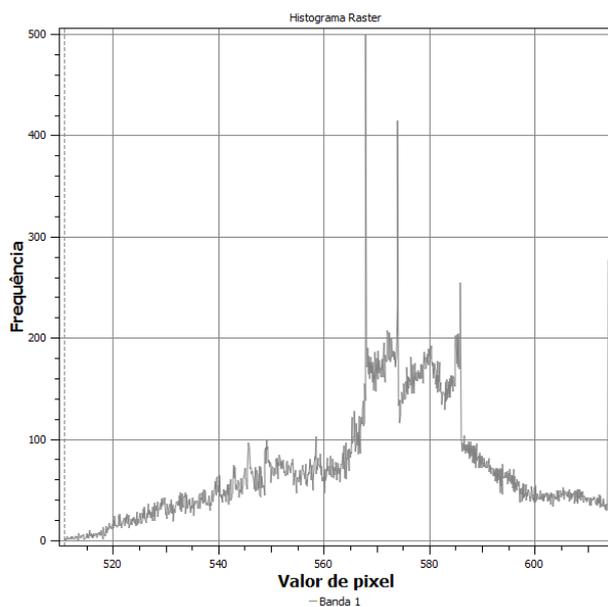


Figura 45. Mapa Hipsométrico MDT Interpolado



MDT Interpol	
MAX	614
MEAN	571.39
MIN	510.82
STDDEV	20.77

Figura 46. Histograma e estatística do mapa hipsométrico MDT Interpolado

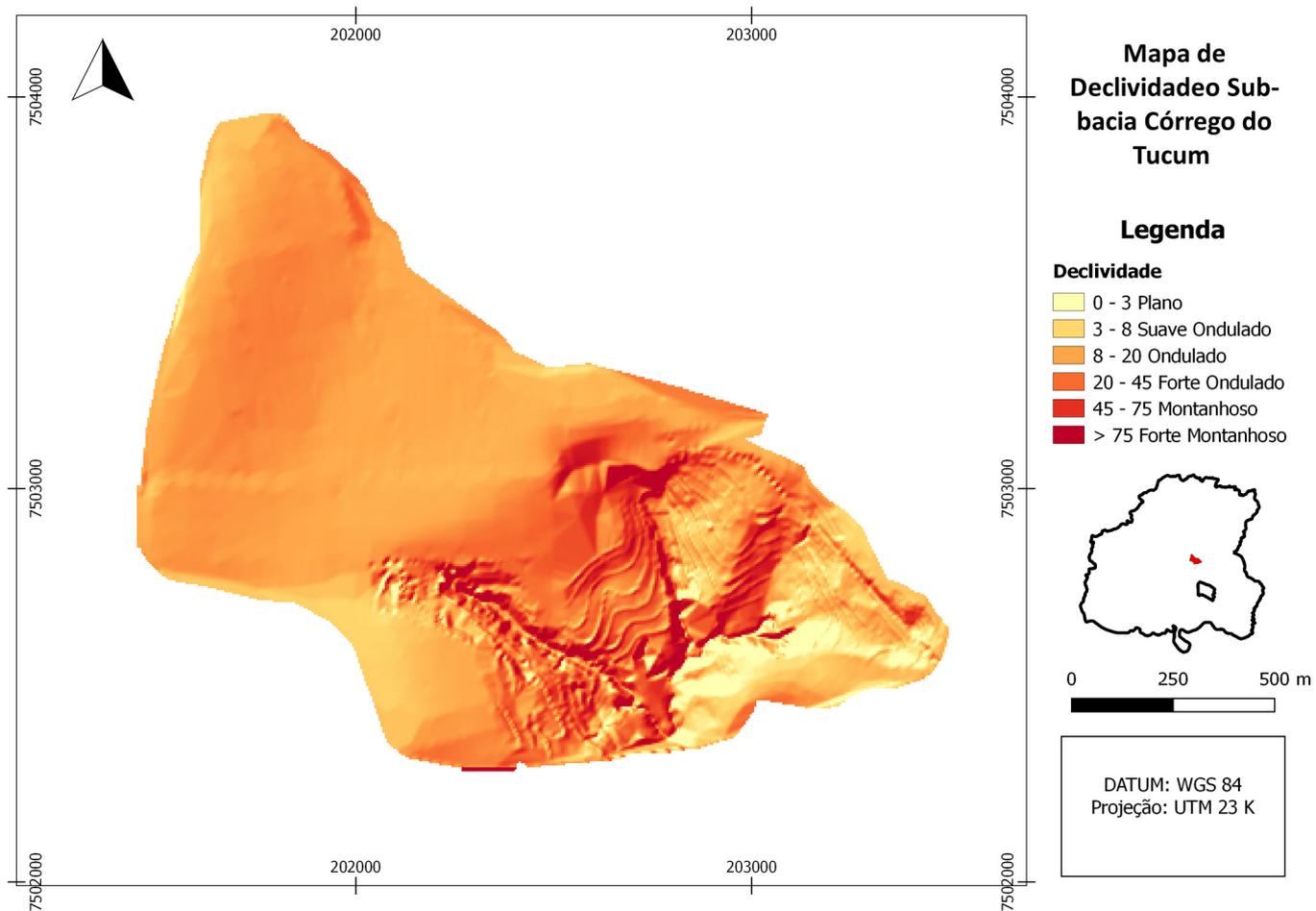


Figura 47. Mapa de Declividade MDT Interpolado

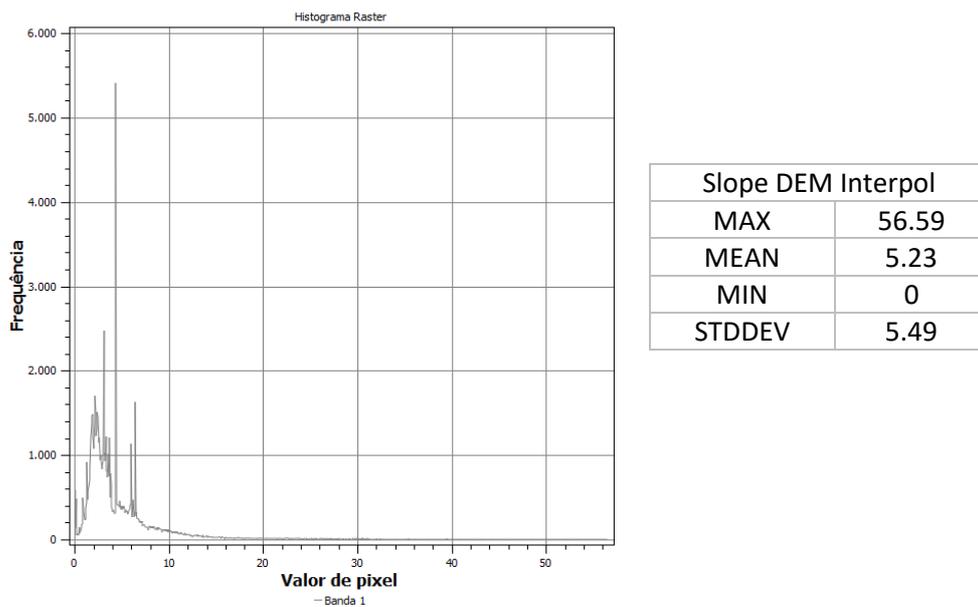


Figura 48. Histograma e estatística do mapa de declividade MDT Interpolado

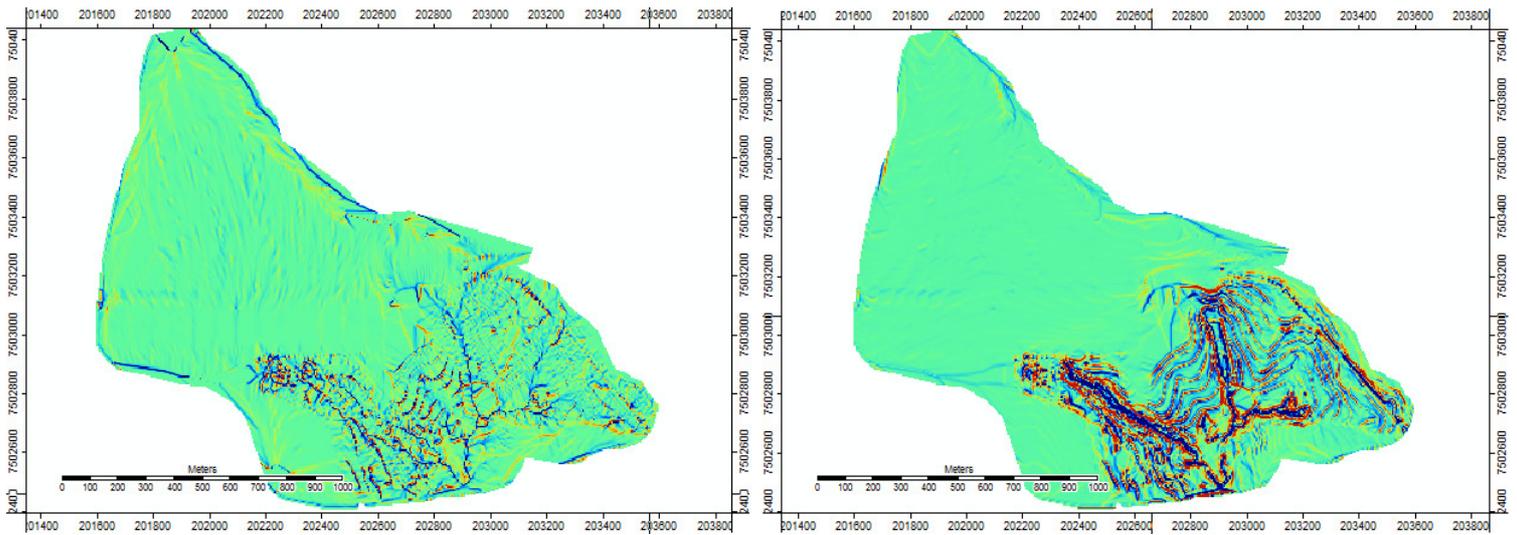
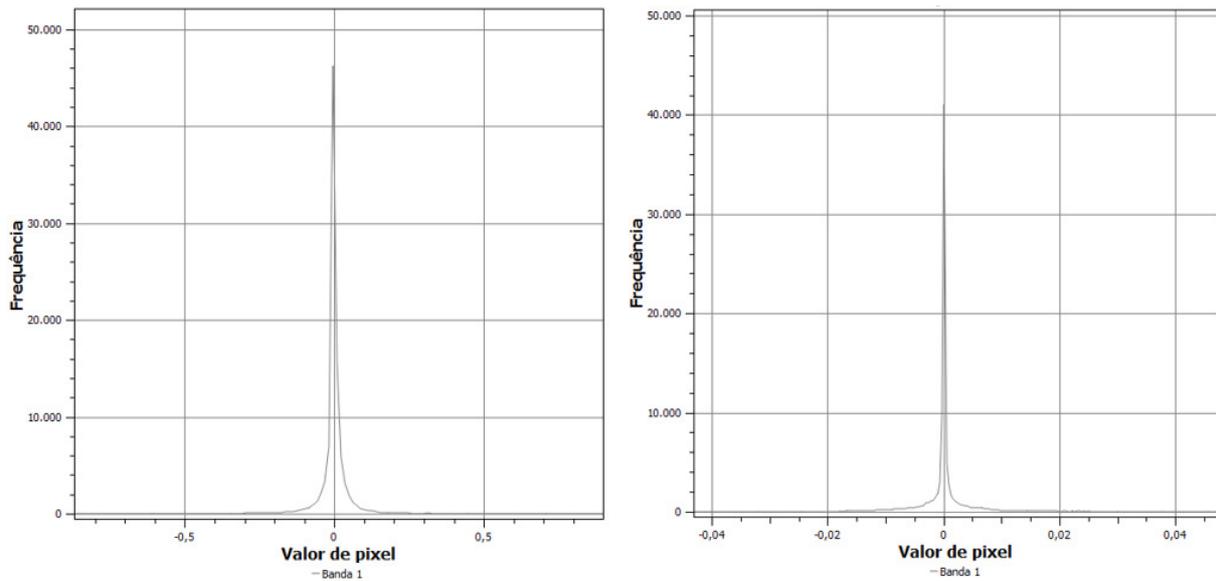


Imagem 49. Mapa de curvaturas horizontal e vertical do MDT Interpolado



Plan Curv DEM Interpol	
MAX	4.92
MEAN	-0.002
MIN	-8.26
STDDEV	0.12

Profile Curv DEM Interpol	
MAX	0.13
MEAN	0.0001
MIN	-0.25
STDDEV	0.012

Figura 50. Histogramas das curvaturas horizontal e vertical do MDT Interpolado

Em relação aos mapas elaborados através dos pontos cotados e estações totais, podemos observar grande diferença comparado aos outros modelos devido a precisão dos dados. A Estação Total utilizada por Dener (2016) é da marca Ruide, modelo RTS 825 R3.

Diferentemente dos dados base da SRTM e TanDEM-X que fazem o levantamento não somente do terreno mas também da cobertura, quando fazemos um levantamento de dados altimétricos através das curvas de nível e/ou estação total, estamos agregando somente valores que temos certeza que dizem respeito à elevação do terreno, sem interferência da cobertura do mesmo. Esse fator dá um caráter muito preciso aos dados e, conseqüentemente, aos modelos gerados.

De todos os histogramas, os do modelo interpolado são os que apresentam menos ruídos e, em relação à representação visual é o que oferece mais detalhes para a simulação do terreno. No mapa de declividade inclusive podemos observar bem nitidamente a marcação dos cordões de terraceamento das inúmeras intervenções e remediações feitas no local.

Abaixo foram comparadas as estatísticas e as imagens geradas para todos os modelos, do menor para o maior grau de detalhamento.

Em relação à reamostragem do SRTM de 30m de resolução para 25m, realmente observamos algumas diferenças no refinamento nos dados.

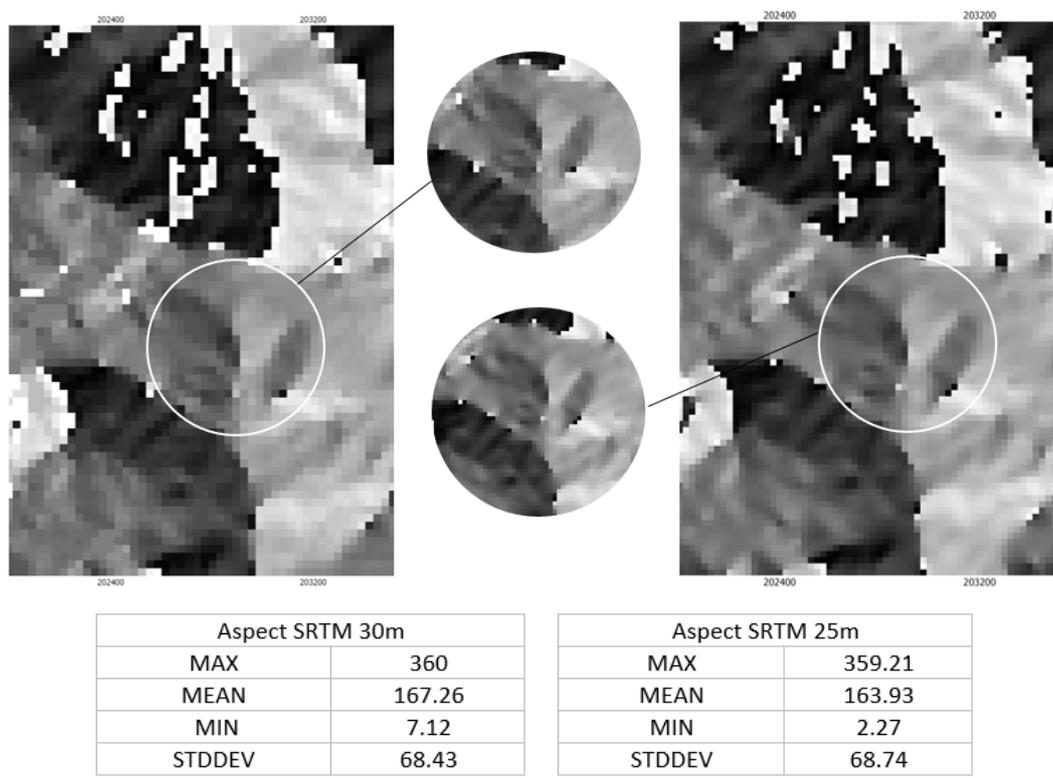
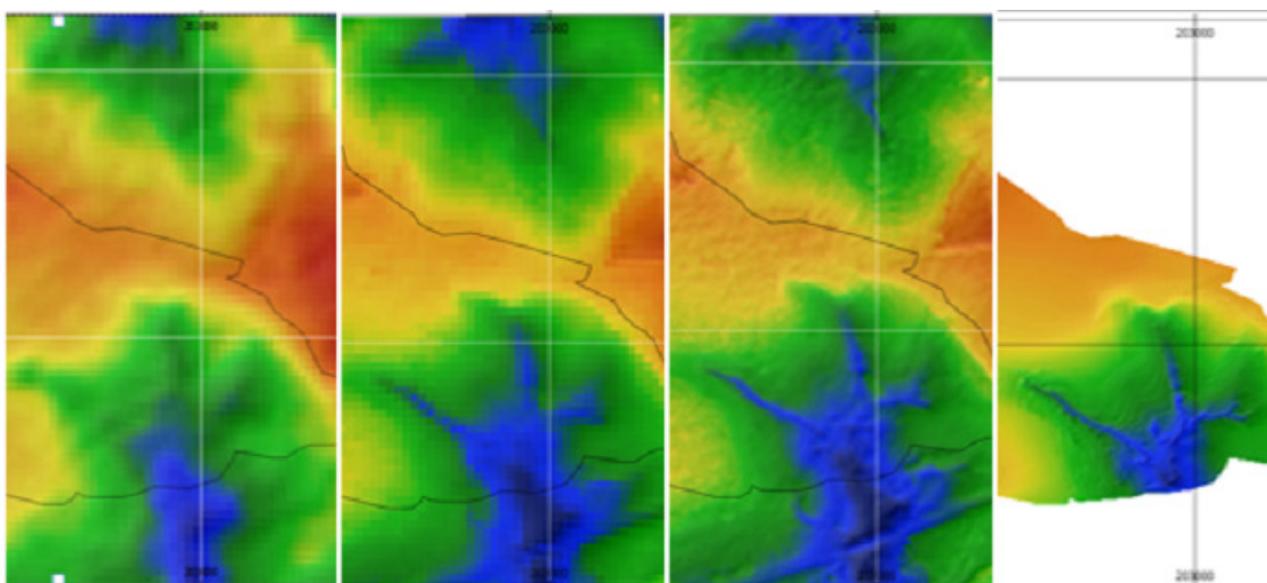


Figura 51: Comparação entre os mapas e estatísticas dos mapas de orientação de vertentes dos SRTM 30m e SRTM 25m

No detalhe da imagem fica bem visível a diferença entre as imagens, tanto em forma como em detalhe informação – é bem mais nítido no SRTM reamostrado o direcionamento das vertentes, e também na questão visual melhora bastante o fator pixelamento e, numa reamostragem dessas, o formato do terreno continua em uma escala de representação mais próxima ao “real”.

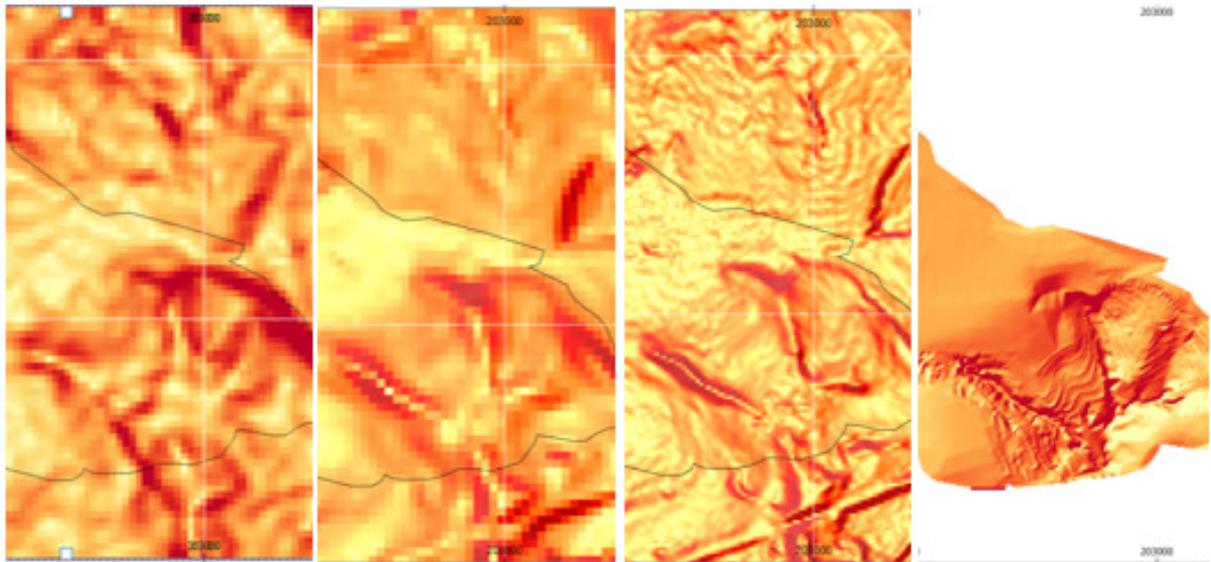
Houve pouca diferença nos dados, mais relacionado a uma readaptação de leitura destes do que modificação, mas que fazem bastante diferença no resultado visual.

Em relação aos mapas hipsométricos e de declividade dos modelos também é muito interessante notar a diferença no detalhamento:



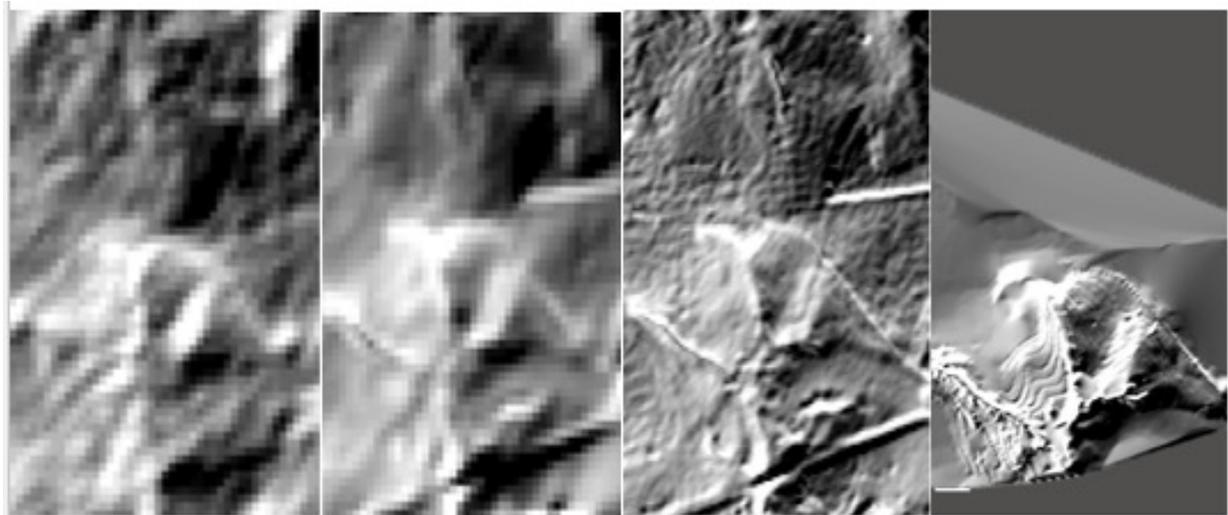
Altimetria	MAX	MIN	MEAN	STDDEV
SRTM 30m Reamostr.	618.87	510.73	576.27	20.74
TanDEM-X 30m	610.61	500.80	566.81	20.95
TanDEM-X 12m	613.00	495.45	566.89	21.15
MDT Interpolado	614	510.82	571.39	20.77

Figura 52: Comparação entre os mapas hipsométricos de todos os modelos



Declividade	MAX	MIN	MEAN	STDDEV
SRTM 30m Reamost.	21.38	0.04	4.85	3.31
TanDEM-X 30m	23.07	0.10	5.05	3.72
TanDEM-X 12m	45.50	0	6.89	4.93
MDT Interpolado	56.59	0	5.23	5.49

Figura 53: Comparação entre os mapas de declividade de todos os modelos

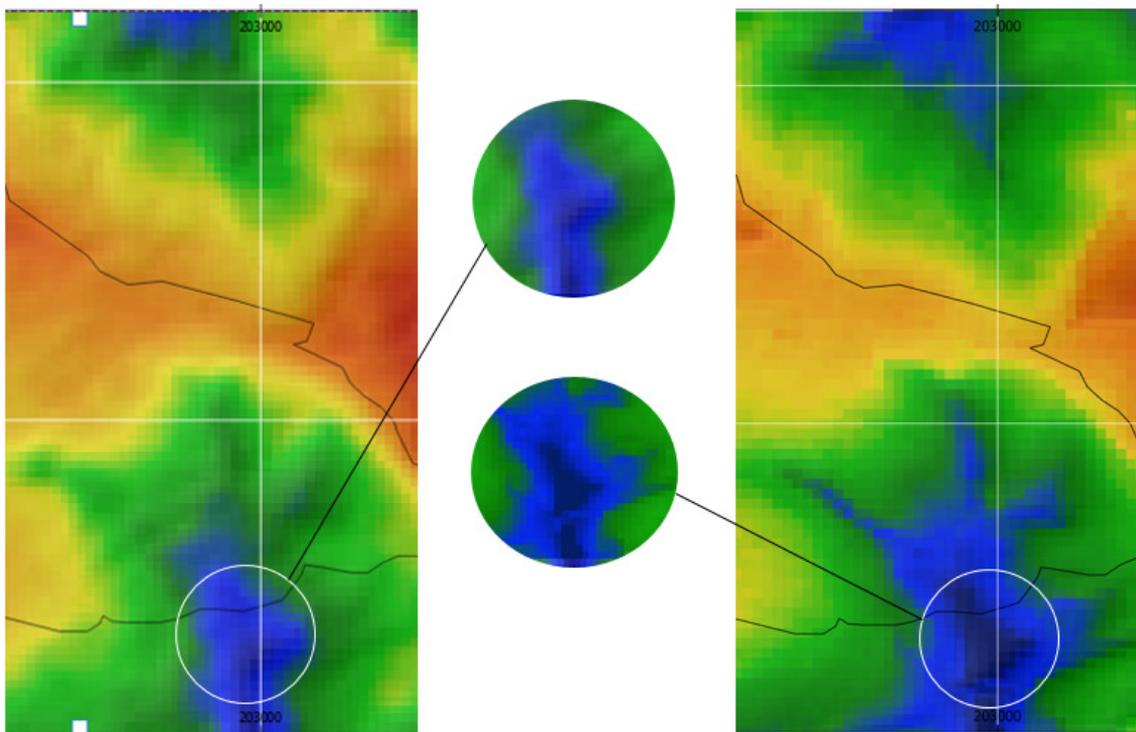


Aspecto	MAX	MIN	MEAN	STDDEV
SRTM 30m Reamost.	359.21	2.27	163.93	68.74
TanDEM-X 30m	359.97	0.86	166.53	67.43
TanDEM-X 12m	359.97	0.04	168.34	82.61
MDT Interpolado	360	0	168.05	63.73

Figura 54. Comparação entre os mapas de orientação de vertentes dos modelos.

O relevo sombreado apresentado tem como característica a apresentação do relevo com exagero vertical tal que exista um equilíbrio constante entre iluminação e sombra em cada imagem exibida, independentemente de seu relevo de fato, para tal efeito escolheu-se uma iluminação a 45° de elevação e 315° de azimute, em uma posição noroeste.

Entre as imagens de mesma resolução como as SRTM de 30m e a TanDEM-X de 30m podemos ver uma diferença grande no detalhamento, mesmo reamostrando os dados para 25m de resolução.



DEM SRTM 25m	
MAX	618.87
MEAN	576.27
MIN	520.73
STDDEV	20.74

DEM <u>TanDEM-X</u> 30m	
MAX	610.61
MEAN	566.81
MIN	508.80
STDDEV	20.95

Figura 55. Comparação entre mapa hipsométrico SRTM 25m e TanDEm-X 30m.

Abaixo podemos observar cada um dos histogramas de cada aspecto gerado nos modelos de terreno, comparadas em relação à sua qualidade de informações:

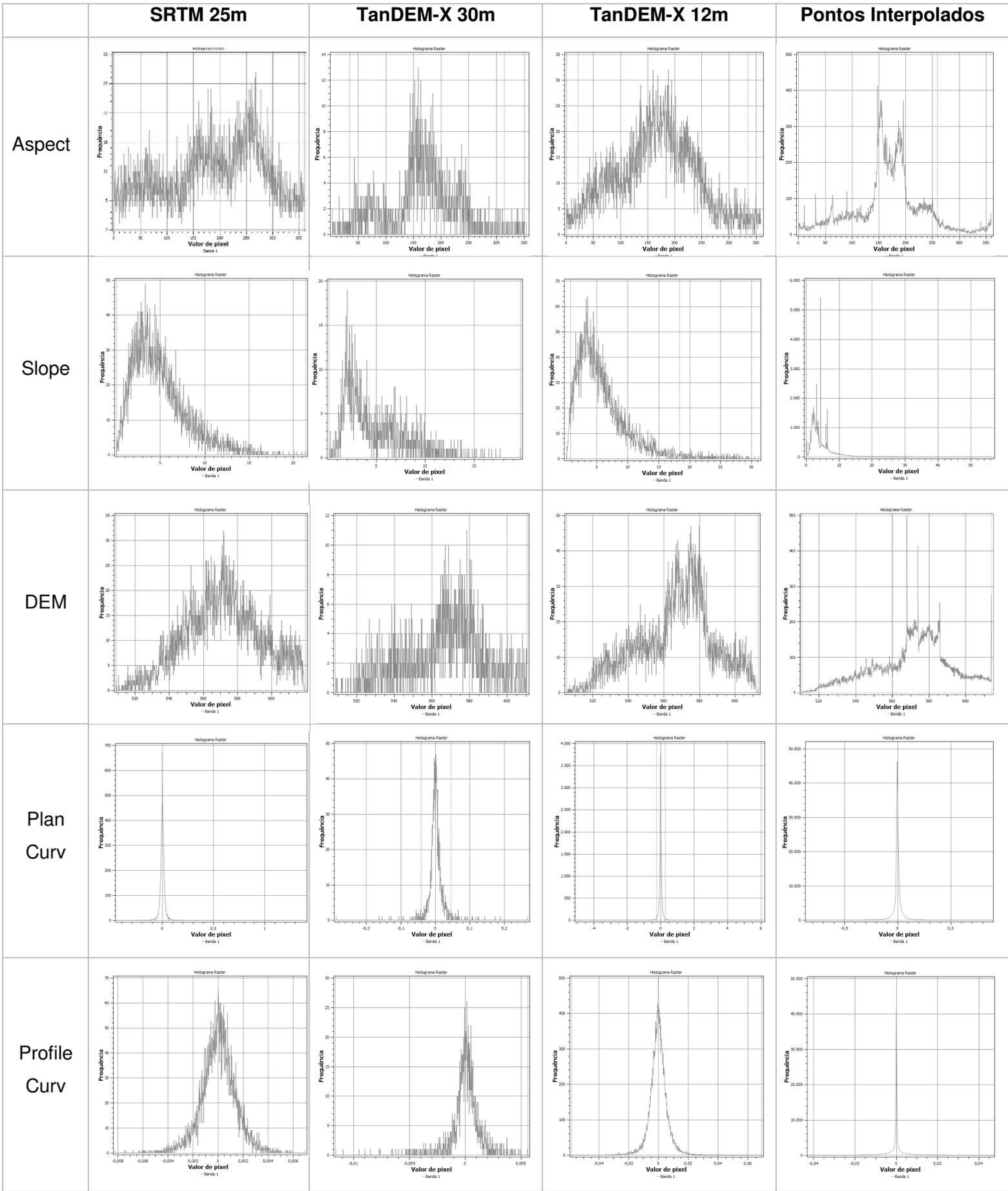


Tabela 4: Comparação dos histogramas de todos os modelos gerados.

Observando a tabela anterior percebemos que é incomparável a qualidade muito superior dos dados obtidos através das estações totais e posterior interpolação dos pontos, com consideravelmente menos ruídos e oscilações de valores.

8. Conclusão

Analisando a feições erosivas no córrego do Tucum ao longo dos anos, é nítida a evolução dos processos de acordo com o desenvolvimento da área urbana no entorno. A dinâmica de todo o local se intensificou proporcionalmente ao loteamento e ocupação devido à falta de planejamento da obra.

Toda a área de estudo apresenta hoje um solo altamente retrabalhado com diversos matérias que são, em sua maioria, solos arenosos de outros locais da erosão, ou até mesmo de fora dela, mas que não diferem fortemente com o material presente no local, consequência essa das diversas intervenções feitas no local. Por esse motivo a dinâmica do solo desta área é muito intensa e instável, podendo abrir grandes talhes no solo em um único episódio de chuva.

Foram realizados diversos projetos de contenção das erosões e prevenção das mesmas, mas até o ano 2000 todos os projetos foram executados sem planejamento prévio e conseqüentemente sem levar em consideração toda a dinâmica dos processos erosivos e as particularidades desta área, resultando em seguidos eventos de ruptura das obras instaladas e desenvolvimento de novas feições erosivas.

Concluiu-se que em relação à área que compreende as feições, foi observado que a mesma após medidas aplicadas no ano 2000, após planejamento e levando em consideração desde as características climáticas até as características de terreno e desenvolvimento urbano, apresentou constante diminuição e crescente estabilização em boa parte do local, porém com muitas consequências de ordem socioambiental, como o assoreamento do córrego, a retirada de cobertura vegetal, os riscos de proliferação de doenças devido ao grande depósito de resíduos nas erosões e os riscos de vida quando consideramos possíveis movimentações de massas.

Os Modelos Digitais de Terreno e de Elevação constituem parte muito importante nos trabalhos de avaliação geomórficas e geomorfológicas do terreno, proporcionando diferentes análises estatísticas e visuais, em conjunto ou não com outros dados.

Em relação aos dados SRTM e TanDEM-X não há dúvidas da superior qualidade do TanDEM-X, mesmo quando comparadas imagens de mesma resolução espacial. Já em relação aos dados interpolados, obtidos através de levantamento por estação total, e os dados TanDEM-X de resolução 12m concluiu-se que os dados de levantamento em campo apresenta melhores resultados, como podemos observar junto às estatísticas comparadas, e de acordo com a necessidade de detalhamento e exatidão de dados o levantamento de informações por estação total e cotação de curvas de nível apresentam resultados mais fiéis ao real.

Apesar dos modelos orbitais gerados por levantamento em campo apresentarem dados mais refinados e com maior precisão, ainda é válido ponderar sobre adquirir dados como o de elevação obtidos através de radares de grande precisão como se apresentam os dados TanDEM-X em diversas situações, considerando a necessidade de precisão dos dados e também seu custo em obtenção.

Para análises de terreno que incluem as variáveis ambientais principalmente conclui-se que os dados SRTM podem não contribuir tanto para trabalhos com uma escala muito grande, onde se precise de um maior detalhamento e acompanhamento de atributos variáveis, mesmo quando reamostrados para resoluções maiores.

Sugere-se a final que trabalhos que continuem a acompanhar a dinâmica da área e projetos que visem a recuperação da mesma levando em consideração todas as particularidades necessárias, continuem a ser desenvolvidos para além de contribuir com as futuras tomadas de decisão possam servir também para complementar o banco de dados deste local que se tornou um grande estudo de caso.

9. Referências Bibliográficas

ARAÚJO, T. P. Estudo do Desencadeamento das Erosões Lineares Concentradas em uma Área do Município de São Pedro/SP. São Carlos, 2011. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

ARAUJO, G.H.S. et al. Gestão de áreas degradadas. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2007.

ANDRADE, D.C. & ROMEIRO, A. R. Degradação Ambiental e Teoria Econômica: Algumas Reflexões sobre uma “Economia de Ecossistemas”. Revista Economia, Brasília (DF), v.12, n.1, p.3-26, jan/abr 2011.

ALMEIDA FILHO, G. S. – Prevenção de erosão em áreas urbanas. In: VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE. Presidente Prudente-SP.. 1998.

BARROS et al Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.

BRENNING & DONOVAN, Introduction to Terrain Analysis with RSAGA: Landslide Susceptibility Modeling, 2015.

BITAR ET AL. (COORD.) Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, São Paulo, ABGE, p. 187-202, 1995.

CARPI JR, S. Técnicas cartográficas aplicadas à dinâmica da bacia do Ribeirão Araquá – SP. Dissertação de Mestrado. UNESP/ IGCE – Rio Claro, 1996.

CARVALHO, J. C., LIMA, M. C & MORTARI, D. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE. Goiânia-GO, 2011.

CARVALHO, J. & MORTARI, D. Formação e contenção de voçorocas no Distrito Federal. In: 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE/UNES. Bauru–SP, 1995.

CARDOSO, R.S.B; PIRES, L.V. VOÇOROCAS: PROCESSOS DE FORMAÇÃO, PREVENÇÃO E MEDIDAS CORRETIVAS, Universidade Federal de Viçosa, 90p.

CARPANEZZI, A. A. Espécies pioneiras para recuperação de áreas degradadas: observação de laboratórios naturais. In: 6º Congresso Florestal Brasileiro - Anais, Campos do Jordão, SP, Sociedade Brasileira de Silvicultura, p. 216-21, 1990.

CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S.N.A. Geologia de Engenharia, São Paulo. ABGE, p. 227 – 241, 1998.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de Sistemas Ambientais. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COELHO, L. & BRITO, J. N. Fotogrametria Digital, Rio de Janeiro. EdUERJ, 196p. 2007.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T., Geomorfologia: Exercícios Técnicas e Aplicações, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 343 p.

DAEE. Controle de erosão: bases conceituais e técnicas, diretrizes para planejamento urbano e regional; orientação para o controle de boçorocas urbanas. 2ª ed. São Paulo: DAEE/IPT, 1990.

DOORNKAMP, J.C.; King, C.A.M. Numerical analysis in geomorphology: An introduction. London: Edward Arnold Ltd., 372p, 1971.

ESRI. Sitio digital: <http://www.gis.com/whatisgis/index.html> - Acessado em 27/10/2015.

ENGE L& PARROTA. Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais. Pp. 1-26 In: Kageyama, P.Y., de Oliveira, R.E., de Moraes, L.F.D., Engel, V.L. and Mendes, F.B.G. (Eds.) "Restauração ecológica de ecossistemas naturais ", Botucatu (SP), Brazil, 2003.

SRTM X-SAR calibration results. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001.

IGARSS '01. IEEE 2001 International, volume 2, pages 748 –750 vol.2.

EVANS, I. S., Spatial Analysis in Geomorphology. Harper & Row, New York, Ch. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, pp. 17–90, 1972.

FERREIRA-DANTAS, M. Análise da Evolução dos Processos Erosivos Acelerados em Áreas Urbanas e das Técnicas de Controle e Recuperação - Córrego do Tucum (São Pedro/SP). São Carlos, 2004. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2004.

FERREIRA, M. D. Proposta de Índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas. Vol. 1. Dissertação (Doutorado) – EESC/USP. São Carlos, SP. 2008, 447p.

FREIRE, N. C.F, PACHECO, A. P. Aspectos da detecção de áreas de risco à desertificação na região de Xingó. XII. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Anais, Goiânia, Brasil, abril 2005, INPE.

FOURNIER, F. Climat et Erosion. PUF, Paris, 1960

FIELDING, E. J., ISACKS, B., BARAZANGI, M., DUNCAN, C., How flat is Tibet? *Geology* 22, 163–167. 1994.

FLORINSKY, I. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Academic Press. Academic, 2011.

GOMES, W. S; SERIKAWA, V. S. ; DANTAS-FERREIRA, M. ; LORANDI, R. Inventário de Processos Erosivos em Área Urbana. Congresso Nacional de Geotecnia, 2012, Lisboa-Portugal. 13o. Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa-Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2012. v. 1. p. 1-12.

GOMES, D. M. Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/ SP. Dissertação (Mestrado) – EESC/USP. São Carlos, SP. 2002, 242p.

GALERANI, C. A. (1995) – Descrição das ações de controle de erosão urbana no noroeste do estado do Paraná. In: 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE/UNESP. Bauru-SP.

GOMES, D. M. Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/SP, na escala 1:20.000. Dissertação (Mestrado) – EESC/USP. São Carlos, SP. 2002, 242p.

GROHMANN, C. H., RICCOMINI, C., STEINER, S. S., 2008. Aplicações dos modelo de elevação SRTM em geomorfologia. *Revista Geográfica Acadêmica* 2, 73–83.

GROHMANN, C. H., 2015. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers & Geosciences* 77, 111–117.

GROHMANN, C. H., RICCOMINI, C., 08 2012. Análise digital de terreno e evolução de longo-termo de relevo do centro-leste brasileiro. *Geologia USP. Série Científica* 12, 129 – 150.

HUDSON, P. F.; ALCÁNTARA-AYALA, I. Ancient and modern perspectives on land degradation. *Catena* 65:102–106. 2006.

IBGE, Disponível em

<https://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/processo_cartografico.html> acessos em 18/03/2017

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Noções Básicas de Cartografia*. 1998. Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa de Informações Básicas Municipais: Perfil dos Municípios Brasileiros – 2006*. Rio de Janeiro, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT . (1997) *Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo - Síntese*. São Paulo. (IPT. Relatório, 36 071).

IWASA, O. Y.; FENDRICH, R. Controle de Erosão Urbana. In: OLIVEIRA, A. M. S. e BRITO, S. N. A. (editores). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, cap. 16, pag. 271 – 281, 1997.

KÖEPEN, W. Climatologia, com um Estudio de los Climas de la Tierra. Mexico: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

KRIEGER, G., ZINK, M., FIEDLER, H., HAJNSEK, I., YOUNIS, M., HUBER, S., BACHMANN, M., GONZALEZ, J., SCHULZE, D., BOER, J., WERNER, M., MOREIRA, A., May 2009. The TanDEM-X Mission: Overview and status. In: Radar Conference, 2009 IEEE. pp. 1–5.

KOBIYAMA, M. et all. Áreas degradadas e sua recuperação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.22, n. 210, p. 10-17, mai/jun. 2001.

LAL, R. Soil degradation by erosion. Land degradation & development. 2001

LAL, R. AND P.F. REICH. Land degradation: an overview. In: Bridges, E.M., I.D. Hannam, 2001

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos, Revista de Geografia, v. 27, n. 3, p. 204, 2010

MARCHETTI & GARCIA. Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação. São Paulo: 1ª Edição. Editora Livraria Nobel S.A. 1977, 257p7

MACIEL FILHO, C. L. Introdução à geologia de Engenharia. Editora da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. 1994, 283p.

MEA. Ecosystem and human well-being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment. Washington DC: Island Press, 2005.

MEIRELLES, M. S. P.; ALMEIDA, C. M. de; CÂMARA, G. (Ed.). Geomática: modelos e aplicações ambientais. Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 593 p.

MINTER/IBAMA. Manual de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração: Técnicas de Revegetação. Brasília, IBAMA, 96p, 1990.

MILLER, C. L., AND R. A. LAFLAMME. 1958a The Digital Terrain Model-Theory and Application. Photogrammetric Engineering, Vol. XXIV, No.3, p. 433, June 1958.

MAUNE D.F. *et al* Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. American Society for photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD.

MOORE, I. D. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes 5, 3–30. Ano 1991.

MOREIRA, C. V. R. e PIRES NETO, A. G. Clima e Relevo. In: OLIVEIRA, A. M. S. e BRITO, S. N. A. (editores). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, cap. 5, pag. 69 – 85, 1997.

MORAES, E. C. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. In: RUDORFF, B. F. T. et al. Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. INPE. São José dos Campos. 2002.

MUNSHOWER, F.F. Practical handbook of disturbed land revegetation. Boca Raton, Lewis Publishers, 1994.

MCCORMAC, J. C. Topografia. Clemson University. 5ª edição. Reimpresso e traduzido. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007, 391p

NEVES, K. D. (2012) – Análise multitemporal de Áreas Degradadas por processos erosivos a partir de Ferramentas Fotogramétricas. (Iniciação Científica), UFSCar, São Carlos – SP.

OLIVEIRA, J S. *et al*. Estimativas de perda de solos em ambiente sig utilizando diferentes fontes de dados topográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16, 2013, Foz do Iguaçu. Anais XVI SBSR. São José dos Campos: INPE, 2013.

PACHECO, A. P; FREIRE, N. C. F; BORGES, U. N. Uma Contribuição do Sensoriamento Remoto para Detecção de Áreas Degradadas na Caatinga Brasileira. Instituto de estudos sócio-ambientais. Goiânia – GO, 2006.

PRANDINI, F.L. et al. Cartas Geotécnicas nos Panos Diretores Regionais e Municipais.

PRANDINI, F.L. & NAKAZAWA.V.A –A erosão Urbana, algumas considerações. In: V Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE. Bauru-SP. Anais p 95..

PINHEIRO, M. R. Técnicas Cartográficas e Aerofotogramétricas no Estudo da Erosão: Alta Bacia do Ribeirão Araquá – São Pedro e Charqueada / SP. São Paulo, 2009. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 2009.

PROJETO GEMINI. Dissertação (Especialização). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. Departamento de Cartografia, 2002.

PONS, N.A. D (2006) Levantamento e diagnóstico Geológico-Geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos-SP, com auxílio de geoprocessamento.

PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. Cartografia Geotécnica e Geoambiental – Conhecimento do meio físico: Base para a sustentabilidade. Suprema Gráfica Editora Ltda. São Carlos. 1993

VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena. 2005.

POLLEFEYS, M. Self-Calibration and Metric 3D Reconstruction from Uncalibrated Image Sequences, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, 1999.

SANTORO, J. Fenômenos Erosivos acelerados região de São Pedro-SP. Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica. Dissertação de Mestrado. IGCE – 1991

SHARY, P. A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. Geoderma 107, 1–32, 2002.

SILVA, E. S. Utilização de Ortofotocartas Digitais no Sistema de Gerenciamento de Redes da Distribuição – CEMIG. 2003

SILVA, A. F. Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na bacia do córrego tuncum, São Pedro-SP, escala 1:10.000. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOUZA, M. P. Instrumentos de gestão ambiental: fundamentos e prática. São Carlos: Riani Costa, 2000.

SOUZA, M. L. Proposta de um Sistema de Classificação de Feições Erosivas Voltados à Estudos de Procedimentos de Análises de Decisões Quanto a Medidas Corretivas, Mitigadoras e Preventivas: aplicação no município de Umuarama (PR), Unesp: 2001.

STIPP, Nilza Aparecida Freres et al. - ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARA – UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS - Portal da Cartografia, Londrina v. 3 n. 1, 2010

RIBEIRO, J. C. Fotogrametria Digital. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal.

RIDENTE, J.L.J. Prevenção e Controle da Erosão Urbana: Bacia do Córrego do Limoeiro e Bacia do Córrego do Cedro, Municípios de Presidente Prudente e Álvares Machado, SP – Tese de Mestrado. UNESP, Rio Claro –SP, 2000.

RIDENTE, J.L.J. & ALMEIDA FILHO, G. S. Mini-Curso 1: Diagnóstico, Prognóstico e Controle de Erosão In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE. Goiânia – GO, 2001.

RODRIGUES, J.E. Estudo de Fenômenos Erosivos Acelerados – Boçorocas. Tese de Doutorado – Departamento de Vias de Transporte e Topografia. São Carlos, SP. EESC/USP, 162p, 1982.

TEMBA, P. Fundamentos da Fotogrametria. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2000.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos, 2004.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 2005, Goiania, Anais XII SBSR. São José dos Campos: INPE, 2006.

YAMANOUTH, G. R. B. Avaliação dos Processos Erosivos e das Técnicas de Controle e Reabilitação - Bacia do Córrego do Espriado (São Pedro - SP). Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZUQUETTE, L. V. Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração. Tese Livre-Docência – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. Cartografia Geotécnica. São Paulo: Oficina de Textos, Universidade de São Paulo, 2004.