



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.28.22.24-TDI

AVALIAÇÃO DOS DADOS SRTM E GDEM APLICADOS À MODELAGEM DO FATOR TOPOGRÁFICO DA USLE

Moisés Pereira Galvão Salgado

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Antônio Roberto Formaggio, e Bernardo Friedrich Theodor
Rudorff, aprovada em 18 de abril de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39DNLFL>>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivêca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.28.22.24-TDI

AVALIAÇÃO DOS DADOS SRTM E GDEM APLICADOS À MODELAGEM DO FATOR TOPOGRÁFICO DA USLE

Moisés Pereira Galvão Salgado

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Antônio Roberto Formaggio, e Bernardo Friedrich Theodor
Rudorff, aprovada em 18 de abril de 2011

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39DNLFL>](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39DNLFL)

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S32a Salgado, Moisés Pereira Galvão.
Avaliação dos dados SRTM e GDEM aplicados à modelagem do fator topográfico da USLE / Moisés Pereira Galvão Salgado. – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxvi+ 123 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.28.22.24-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Antônio Roberto Formaggio, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff.

1. Erosão. 2. Geomorfologia. 3. Sensoriamento remoto. 4. Geoprocessamento. 5. Hydrologia. I. Título.

CDU 632.125.528.8 (815.6)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

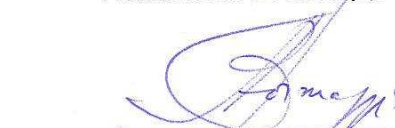
Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

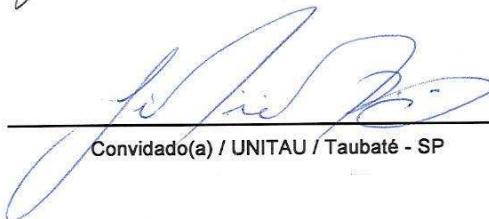
Dr. Antonio Roberto Formaggio


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Getúlio Teixeira Batista


Convidado(a) / UNITAU / Taubaté - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): Moisés Pereira Galvão Salgado

São José dos Campos, 18 de abril de 2011

“Science may be described as the art of systematic over-simplification”.

“A ciência pode ser descrita como a arte da excessiva simplificação sistemática”.

Karl Popper

Aos dedicados às ciências da conservação do solo e demais recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo em toda minha vida. Agradeço todas as dificuldades que enfrentei, não fosse por elas eu nada teria aprendido. A meu pai e minha mãe, cuja fé em mim ensinou-me a ter fé em mim mesmo e em Deus. Aos meus orientadores, professores, colegas, amigos, familiares e todos que compartilharam desta oportunidade.

Toda gratidão ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em especial à Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR e à Divisão de Processamento de Imagens – DPI da Coordenação-Geral de Observação da Terra – OBT e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio recebido ao longo desta pesquisa.

RESUMO

O fator topográfico é empregado na *Universal Soil Loss Equation* (USLE) para estimar o potencial erosivo determinado pelas formas do relevo. A modelagem do fator topográfico requer dados altimétricos para a extração de variáveis topográficas empregadas na estimativa do potencial erosivo. A presente pesquisa teve o objetivo de avaliar a aplicação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados com base nos dados altimétricos obtidos por Sensoriamento Remoto (SR) orbital, *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e *ASTER Global Digital Elevation Model* (GDEM), para estimar o fator topográfico utilizado na modelagem da erosão. Para isto, foram analisadas as diferenças entre os MDE obtidos com base nos dados SRTM e GDEM em relação aos obtidos utilizando dados cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com escala 1:50.000 e do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) com escala 1:10.000. Buscou-se avaliar a influência do espaçamento da grade do MDE e os diferentes algoritmos de distribuição de fluxo, *Deterministic 8 (D8)* e *Multiple Flow Direction (MFD)*, empregados para a modelagem do fator topográfico. A análise de regressão dos resultados, utilizando os MDE gerados com base nos mapas do IGC como referência de precisão, permitiu verificar que os resultados obtidos a partir dos MDE derivados dos dados SRTM apresentam maior correlação ($r = 0,78$) do que os derivados dos dados GDEM ($r = 0,65$) e IBGE ($r = 0,65$). O aumento do espaçamento da grade e a utilização do algoritmo *MFD* favorecem as correlações entre os valores do fator topográfico calculados a partir dos diferentes MDE. Nota-se que os dados SRTM permitem resultados mais precisos que os dados GDEM e IBGE. Conclui-se que os MDE derivados dos dados altimétricos obtidos por SR orbital, SRTM e GDEM, possibilitam estimar o fator topográfico utilizado na USLE com maior precisão, em relação aos MDE derivados de dados cartográficos de escala 1:50.000, possibilitando resultados semelhantes aos conseguidos com MDE derivados de dados cartográficos de escala 1:10.000 quando utilizado espaçamento da grade de 90x90 metros.

ASSESSMENT OF SRTM AND GDEM DATA APPLIED TO MODELING THE TOPOGRAPHIC FACTOR OF USLE

ABSTRACT

The topographic factor is a term of the Universal Soil Loss Equation (USLE) used to estimate the erosive potential of the relief forms. The modeling of the topographic factor requires the elevation data for the extraction of topographic variables used for estimating the erosive potential. Present research aims to evaluate the application of Digital Elevation Models (DEM) generated from elevation data obtained by orbital Remote Sensing (RS), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and the ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM), for estimating the topographic factor used in erosion modeling. The DEM obtained from the SRTM data and GDEM were compared with those obtained by using map data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) at 1:50.000 scale and from the Cartographic and Geographic Institute (IGC) at 1:10.000 scale. The influence of grid spacing of the DEM and differences between the flow routing algorithms used for modeling the topographic factor, Deterministic 8 (D8) and Multiple Flow Direction (MFD), were evaluated. Comparing the results with those obtained from the reference DEM (generated based on maps of IGC) it was noted that the topographic factor obtained from the SRTM DEM showed a higher correlation ($r = 0.78$) than results obtained from GDEM ($r = 0.65$) and IBGE data ($r = 0.65$). The increase in grid spacing and the use of the MFD algorithm increase the correlations between the topographic factor values calculated from different DEM. It was observed that the SRTM data provide more accurate results than the data GDEM. It was concluded that DEM derived from elevation data obtained by orbital SR, SRTM and GDEM, allow estimating the topographic factor used in the USLE with greater accuracy than the DEM derived from 1:50.000 scale map data, favoring the achievement of similar results to those achieved with the DEM derived from 1:10.000 scale map data when a 90m x 90m grid spacing is used on DEM.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Representação do ângulo de declividade ' θ ' e do comprimento de rampa ' λ ' em uma vertente regular planar retilínea.	12
Figura 2.2 – Representação dos diferentes ângulos de declividade (θ_1 , θ_2 e θ_3) e dos respectivos comprimentos de rampa (λ_1 , λ_2 e λ_3) em uma vertente irregular retilínea.....	13
Figura 2.3 – Representação gráfica das funções para o cálculo do fator ' S ', com base no ângulo de declividade.....	15
Figura 2.4 – Representação esquemática da área de captação ' A ', comprimento do fluxo ' l ' e largura do fluxo ' b ',.....	16
Figura 2.5 – Representação gráfica da função para o cálculo do fator de correção da largura do fluxo ' α ', com base no ângulo de aspecto ' ϕ '.....	18
Figura 2.6 – Representação gráfica da largura do fluxo ' b ' em células com espaçamento de grade ' D ' e diferentes ângulos de aspecto ' ϕ ' (0° , 45° e 90°).....	19
Figura 2.7 – Superfície representada em grade regular (A) e TIN (B)	20
Figura 2.8 – Representação da estrutura do Modelo Digital de Elevação.	21
Figura 2.9 – Ônibus espacial Endeavor (A) e sensores banda C (verde) e banda X (amarelo) presentes nas antenas principal (B) e externa (C)	26
Figura 2.10 – Efeitos causados pelo dossel da vegetação nos dados SRTM	27
Figura 2.11 – Satélite Terra (A) e subsistema VNIR (B) com sensores de visada nadir (verde) e retrovisada (azul).....	28
Figura 2.12 – Matriz 3 x 3 com valores de altitude ' Z ' e espaçamento ' D '.	32
Figura 2.13 – Representação dos vetores resultantes (R_1 , R_2 , R_3 e R_4), seus respectivos ângulos (ϕ'_1 , ϕ'_2 , ϕ'_3 e ϕ'_4) e ângulo de aspecto ϕ_1 de R_1	33
Figura 2.14 – Representação dos valores de altitude da grade do MDE e valores da grade de direção do fluxo calculados com base na máscara 3 x 3.....	34
Figura 2.15 – Representação da direção de fluxo e área de captação calculados por meio do algoritmo <i>Deterministic 8</i>	35

Figura 2.16 – Representação da distribuição de fluxo e área de captação calculados por meio do algoritmo <i>Multiple Flow Direction</i> ...	36
Figura 3.1 – Esquematisação do fluxograma geral de atividades.....	39
Figura 3.2 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Una	40
Figura 3.3 – Representação das grades SRTM (esquerda) e ASTER GDEM (direita) utilizadas para a geração dos MDE da bacia do rio Una	42
Figura 3.4 – Representação das 37 cartas do IGC separadas em 4 mosaicos (esquerda) e das 4 cartas IBGE (direita) utilizadas para a geração dos MDE da bacia do rio Una.....	44
Figura 3.5 – Representação cartográfica do Morro Grande por meio das isolinhas do mapa IBGE folha SF-23-Y-D-III-1 com escala de 1:50.000 (acima) e do mapa IGC folha 081-125 com escala de 1:10.000 (abaixo)	45
Figura 3.6 – Geração dos MDE com base nos dados de sensoriamento remoto orbital	47
Figura 3.7 – Modelos de semivariograma exponencial utilizados na Krigagem.....	49
Figura 3.8 – Geração dos MDE com base nos dados cartográficos vetorizados	51
Figura 3.9 – Cálculo das variáveis topográficas e do fator topográfico....	53
Figura 3.10 – Gráfico de caixas utilizado para a análise das distribuições de valores	56
Figura 3.11 – Distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados para a análise de regressão dos resultados	57
Figura 4.1 – Representação do relevo sombreado da bacia do Una utilizando o MDE 30m x 30m gerado a partir dos dados altimétricos dos mapas do IGC.....	60
Figura 4.2 – Representação do exutório da bacia do rio Una utilizando relevo sombreado aplicado aos diferentes MDE avaliados ..	61
Figura 4.3 – Representação da Serra do Quebra Cangalha utilizando relevo sombreado aplicado aos diferentes MDE avaliados ..	62
Figura 4.4 – Representação dos MDE gerados a partir da interpolação das isolinhas extraídas dos mapas do IBGE e IGC.....	63
Figura 4.5 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D do Morro Grande por meio dos diferentes MDE avaliados.....	65
Figura 4.6 – Análise de regressão dos valores de altitude dos MDE gerados com base nos dados SRTM, GDEM e IBGE em relação ao MDE derivado dos dados IGC	66

Figura 4.7 – Análise de regressão dos valores de declividade dos MDE gerados com base nos dados SRTM, GDEM e IBGE em relação aos derivados dos dados IGC	67
Figura 4.8 – Análise de regressão dos valores de área de captação contidos nos MDE gerados com base nos dados SRTM, GDEM e IBGE em relação aos derivados dos dados IGC.....	67
Figura 4.9 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'L' D8 no Morro Grande	69
Figura 4.10 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'L' MFD no Morro Grande	70
Figura 4.11 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'S' na região do Morro Grande	73
Figura 4.12 – Representação do relevo sombreado sobreposto pela distribuição espacial do fator 'LS' MFD IGC 90x90 na bacia do rio Una.....	75
Figura 4.13 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'LS' D8 no Morro Grande	77
Figura 4.14 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'LS' MFD no Morro Grande	78
Figura 4.15 – Representação em perspectiva 3D dos diferentes espaçamentos de grade utilizados e características das superfícies geradas.....	79
Figura 4.16 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D sobreposto pelo fator 'LS' D8 IGC calculado utilizando diferentes espaçamentos de grade em uma região no interior da bacia do Una.....	80
Figura 4.17 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D sobreposto pelo fator 'LS' MFD IGC calculado utilizando diferentes espaçamentos de grade em uma região no interior da bacia do Una.....	81
Figura 4.18 – Distribuição espacial do resíduo absoluto calculado com base nas grades do fator topográfico 'LS' MFD 90x90 na bacia do rio Una e visualização em perspectiva 3D do Morro Grande	83
Figura 4.19 – Distribuição espacial do resíduo absoluto calculado com base nas grades 90x90 do fator topográfico 'LS' MFD SRTM e GDEM na região plana da bacia do rio Una	84
Figura 4.20 – Distribuição espacial do resíduo absoluto calculado com base nas grades 90x90 do fator topográfico 'LS' MFD SRTM e GDEM na região de relevo acidentado na bacia do rio Una..	84

Figura 4.21 – Histogramas representando as distribuições de valores do resíduo absoluto calculado com base nas grades 90x90 do fator topográfico ‘LS’ MFD SRTM, GDEM e IBGE..... 86

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Características das grades dos MDE gerados utilizando a Krigagem.....	50
Tabela 3.2 – Características das grades dos MDE gerados utilizando a ferramenta <i>topo to raster</i>	52
Tabela 3.3 – Fórmulas utilizadas para o cálculo do fator topográfico no módulo <i>Grid Calculator</i> do aplicativo SAGA	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MDE	Modelo Digital de Elevação
SR	Sensoriamento Remoto
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
RUSLE	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>
MUSLE	<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i>
USLE-M	<i>Universal Soil Loss Equation - Modified</i>
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MDT	Modelo Digital do Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
DLR	<i>Deutschen Zentrum für Luft - und Raumfahrt</i>
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
WGS84	<i>World Geodetic System</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
GEOSS	<i>Global Earth Observation System of Systems</i>
VNIR	<i>Visible and Near-InfraRed</i>

SWIR	<i>Short Wave InfraRed</i>
TIR	<i>Thermal InfraRed</i>
EGM96	<i>Earth Gravitational Model</i>
D8	<i>Deterministic 8</i>
MFD	<i>Multiple Flow Direction</i>
Cwa	Clima temperado húmido com inverno seco e verão quente
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
ERSDAC	<i>Earth Remote Sensing Data Analysis Center</i>
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
SAD69	<i>South America Datum 1969</i>
IIQ	Intervalo Interquartílico

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	Milímetro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
t	Tonelada
ha	Hectare
h	Hora
MJ	Mega Joule
°C	Grau Celsius
°	Grau
'	Minuto
''	Segundo
%	Porcentagem
±	Aproximadamente
λ	Comprimento de rampa
θ	Declividade
ϕ	Aspecto
<i>L</i>	<i>Slope length factor</i>
<i>S</i>	<i>Slope steepness factor</i>
<i>LS</i>	<i>Topographic factor</i>
<i>m</i>	<i>Slope length factor exponent</i>
β	<i>Ratio of rill to interrill erosion</i>
<i>A</i>	Área de captação
<i>As</i>	Área de captação específica
<i>b</i>	Largura do fluxo
α	Fator de correção da largura do fluxo
<i>D</i>	Espaçamento da grade

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO..... 1
1.1.	Hipótese..... 2
1.2.	Objetivo..... 2
1.2.1.	Objetivos específicos 2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 5
2.1.	Erosão..... 5
2.1.1.	Erosão hídrica 6
2.2.	Modelagem da erosão..... 8
2.2.1.	Universal Soil Loss Equation..... 9
2.2.1.1.	Cálculo do fator topográfico 12
2.3.	Modelo Digital de Elevação 19
2.3.1.	MDE derivados de dados cartográficos 22
2.3.2.	MDE derivados de dados de Sensoriamento Remoto orbital 24
2.3.2.1.	Shuttle Radar Topography Mission..... 25
2.3.2.2.	Global Digital Elevation Model..... 27
2.4.	Análise do terreno com base no MDE..... 29
2.4.1.	Processamento dos dados altimétricos..... 29
2.4.2.	Cálculo das variáveis topográficas 31
3	MATERIAL E MÉTODOS 39
3.1.	Fluxo de trabalho 39
3.2.	Material..... 40
3.2.1.	Área de estudo 40
3.2.2.	Dados orbitais 42
3.2.3.	Dados cartográficos..... 43
3.2.4.	Especificações dos aplicativos utilizados 45
3.3.	Métodos 46
3.3.1.	Geração das grades dos Modelos Digitais de Elevação..... 47

3.3.2.	Cálculo das grades do fator topográfico	52
3.3.3.	Análise das grades do fator topográfico.....	55
3.3.3.1.	Análise visual	55
3.3.3.2.	Análise estatística descritiva	56
3.3.3.3.	Análise de regressão	56
3.3.3.4.	Análise dos resíduos	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1.	Potenciais e limitações dos MDE utilizados	59
4.1.1.	Fator L	68
4.1.2.	Fator S	72
4.1.3.	Fator LS	74
4.1.3.1.	Distribuição espacial dos erros	82
5	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA	99
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	105
	APÊNDICE C – ANÁLISE DO RESÍDUO PADRONIZADO	121

1 INTRODUÇÃO

O relevo exerce grande influência nos processos erosivos causados pelo escoamento superficial da água da chuva sobre a superfície do terreno. Os modelos de erosão permitem avaliar o potencial erosivo das características topográficas do relevo, possibilitando estimar o montante de solo carregado pela água, determinar as práticas de conservação do solo adequadas e inferir o potencial erosivo dos fatores naturais, clima, solo e relevo. Dentre estes modelos destaca-se a equação de perdas de solo, denominada *Universal Soil Loss Equation* (USLE), e suas diversas formas de aplicação.

O modelo USLE é composto por fatores independentes que avaliam o potencial erosivo dos fatores naturais e fatores relacionados à intervenção humana em determinada área. Dentre estes, o fator topográfico é empregado para a modelagem do potencial erosivo determinado pelas formas do relevo. O desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), da ciência do Geoprocessamento e dos dados obtidos por Sensoriamento Remoto (SR), favorece a aplicação da USLE em bacias hidrográficas. Deste modo, a modelagem do fator topográfico pode se beneficiar dos dados altimétricos coletados por sensores orbitais para a representação computacional das formas de relevo por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) e dos recursos para o processamento destes dados.

Os dados cartográficos constituem uma rica fonte de informações topográficas para a geração de MDE, entretanto a disponibilidade de mapas altimétricos com escala adequada à geração de MDE é limitada a uma pequena porção do território nacional. Além disto, a aquisição e o processamento dos dados cartográficos altimétricos visando à geração de MDE constitui um processo trabalhoso e demorado. Porém, os dados altimétricos obtidos por SR orbital, denominados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e *ASTER Global Digital Elevation Model* (GDEM), apresentam grande potencial para a geração

de MDE e são disponibilizados publicamente para todo território nacional e várias partes do globo terrestre. Portanto, a avaliação destes dados aplicados à geração de MDE visando à modelagem da erosão torna-se necessária para conhecer os potenciais e limitações destas fontes de dados originados por Sensoriamento Remoto orbital.

1.1. Hipótese

O presente trabalho baseia-se na hipótese de que os MDE gerados com base nos dados obtidos por SR orbital e disponibilizados publicamente podem ser utilizados para estimar as variáveis topográficas utilizadas na modelagem da erosão, na ausência de dados altimétricos de maior precisão. Desta forma, é necessário conhecer os potenciais, as limitações e as implicações do uso de MDE originados a partir de diferentes tipos de dados, para a modelagem do fator topográfico que influencia nos processos erosivos.

1.2. Objetivo

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar os MDE derivados de dados obtidos por SR orbital, disponibilizados publicamente para todo o território nacional, como base para o cálculo do fator topográfico utilizado na modelagem da erosão. Desta forma, foram analisadas as diferenças entre o fator topográfico calculado com base nos dados SRTM e GDEM em relação aos resultados obtidos utilizando MDE gerados a partir de cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com escala 1:50.000 e do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) com escala 1:10.000.

1.2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa, determinados de modo a atingir o objetivo geral foram:

- I. Desenvolver uma metodologia padronizada para geração de MDE hidrologicamente corrigidos, com o objetivo de extrair as variáveis topográficas empregadas na modelagem do fator topográfico.
- II. Verificar as diferenças entre os resultados obtidos com base nos diferentes MDE, visando estimar as perdas de precisão e os possíveis erros relacionados à utilização de cada MDE avaliado.
- III. Avaliar os diferentes potenciais dos algoritmos de distribuição de fluxo utilizados para a modelagem do fator topográfico.
- IV. Avaliar a influência do espaçamento da grade do MDE na modelagem do fator topográfico.
- V. Identificar, numa dada área de estudo, as regiões que apresentam maiores diferenças entre os resultados obtidos a partir dos diferentes MDE, buscando analisar a distribuição espacial dos erros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Erosão

A erosão é o processo de desprendimento e arraste das partículas do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985). Trata-se de um fenômeno geológico natural que provoca o nivelamento das montanhas e a formação de planícies, planaltos, vales, várzeas e deltas. Quando excede sua intensidade normal, tornando-se destrutiva, denomina-se acelerada. Este processo é resultante de perturbações antrópicas e promove a degradação do solo (BRADY, 1989).

A erosão natural, através da construção de mecanismos de renovação da fertilidade do solo, apoiou o desenvolvimento das antigas civilizações nos vales do Nilo, Eufrates, Indo, Yangtzé, entre outros. Entretanto, civilizações outrora prósperas desapareceram devido à degradação do recurso fundamental à sustentabilidade, o solo (LOWDERMILK, 1953; OLSON, 1981). O uso inadequado dos recursos naturais ao longo da história da humanidade já resultou em uma perda de aproximadamente um terço da terra arável do planeta devido à erosão acelerada do solo (PIMENTEL et al., 1995). Assim, a erosão acelerada do solo ainda constitui uma das principais ameaças à sustentabilidade da sociedade moderna (MONTGOMERY, 2007).

A degradação do solo é causada pela remoção da camada fértil do solo e consequente perda de nutrientes, diminuição da profundidade de enraizamento, da capacidade de infiltração e retenção de umidade do solo. Todos estes fatores resultam em uma redução do potencial produtivo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985). Além disto, a degradação da estrutura do solo em áreas de declive acentuado favorece a ocorrência de deslizamentos, desmoronamentos e outros tipos de movimento do regolito (CHRISTOFOLETTI, 1980). Sendo assim, a erosão acelerada apresenta uma série de riscos sociais, econômicos e ambientais, devendo ser cuidadosamente avaliada em seus vários aspectos.

As consequências da erosão acelerada não se limitam à degradação do solo. A aceleração do processo erosivo favorece a desertificação (SCHLESINGER et al., 1990), intensifica a poluição e o assoreamento dos cursos d'água (OWENS et al., 2005), promove alterações no habitat natural de diversas espécies ameaçando a biodiversidade (RODRIGUES, 2005) e também contribui para o aquecimento global devido ao aumento da emissão de gases de efeito estufa à atmosfera por meio da remoção do carbono orgânico do solo (STARR et al., 2000; WEST; POST, 2002; POLYAKOV; LAL, 2004).

2.1.1. Erosão hídrica

A erosão hídrica, também conhecida como erosão pluvial, é causada pela ação erosiva da água da chuva (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985). Consiste em uma série de transferências de energia e matéria geradas por um desequilíbrio do sistema solo-água (MAFRA, 2009). O processo erosivo causado pela água das chuvas tem abrangência em quase toda superfície terrestre, em especial nas regiões de clima tropical. Este processo tende a acelerar à medida que mais áreas são ocupadas de maneira inadequada e têm sua cobertura natural modificada para adaptar-se às exigências da produção agropecuária, deixando o solo vulnerável à erosão (GUERRA, 2009).

O processo erosivo tem início com a ação mecânica das gotas de chuva, cujo impacto causa a ruptura dos agregados e o deslocamento de partículas de solo. Este movimento de partículas em direção inconstante é denominado salpicamento ou saltitação. As partículas desagregadas preenchem os poros da superfície do solo provocando a selagem ou selamento e a consequente diminuição da porosidade, reduzindo a infiltração da água e aumentando o escoamento superficial.

Quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo inicia-se o escoamento superficial, principal agente de transporte das partículas de solo. O escoamento laminar ou em lençol tende a se concentrar seguindo caminhos de menor resistência, formando fluxos lineares. Neste estágio do escoamento superficial, a concentração de sedimentos no interior do fluxo linear promove o atrito entre estas partículas e as paredes dos canais, iniciando a formação de sulcos ou ravinas na superfície do terreno. A intensificação do processo erosivo, causado pelo escoamento superficial concentrado, pode culminar em feições erosivas maiores, denominadas voçorocas (GUERRA, 2009).

A quantidade de força gerada pela água do escoamento superficial está relacionada à concentração e velocidade com que esta se move morro abaixo. O tamanho e a quantidade do material em suspensão arrastados pela água dependem da velocidade do fluxo e da força de cisalhamento do escoamento superficial. A topografia do terreno exerce acentuada influência sobre este processo. Deste modo, a energia tende a se concentrar e ser maior em vertentes longas e declivosas, isso faz com que o escoamento superficial produza sulcos e cause maiores perdas de solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985).

As propriedades físicas, principalmente estrutura, textura, permeabilidade e densidade, assim como as características químicas e biológicas dos solos exercem diferentes influências no processo erosivo. As condições físicas e químicas, ao conferir maior ou menor resistência à ação da água, tipificam o comportamento de cada solo exposto a condições semelhantes de topografia, chuva e cobertura vegetal. A cobertura vegetal é a defesa natural do solo contra a erosão, atuando na proteção direta contra o impacto das gotas de chuva e na dispersão da água, interceptando-a e diminuindo a velocidade de escoamento do fluxo pelo aumento do atrito na superfície (BRADY, 1989).

2.2. Modelagem da erosão

Os primeiros trabalhos para desenvolver equações que avaliassem as perdas de solo causadas pela erosão em uma área agrícola datam de 1940 (LAFLEN; MOLDENHAUER, 2003). Estas equações estimam a intensidade das perdas de solo 'A', empregando uma constante 'C' dependente das condições de clima e solo de cada região, o comprimento 'L' e o declive 'S' do terreno, possibilitando a utilização de um fator 'P' que considere o efeito das práticas de conservação na redução das perdas de solo. Ver em Equação 2.1 (ZINGG, 1940) e Equação 2.2 (SMITH, 1941).

$$A = C \times L^{0,6} \times S^{1,4} \quad (2.1)$$

$$A = C \times L^{0,6} \times S^{1,4} \times P \quad (2.2)$$

O desenvolvimento destas equações, determinadas empiricamente a partir de extensos conjuntos de dados coletados em campo e laboratório, culminou em uma equação denominada *Soil Loss Equation* desenvolvida inicialmente para estimar as perdas de solo das áreas agrícolas da região do *Corn Belt* norte americano (WISCHMEIER; SMITH, 1965). Esta equação sofreu uma série de modificações visando superar as restrições climáticas e geográficas próprias dos primeiros modelos e, devido ao seu potencial de aplicação generalizada, passou a denominar-se *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Desde então, diversos modelos foram criados para a análise dos processos erosivos. Os modelos de erosão apresentam diferenças em termos de complexidade, necessidades de dados de entrada, tipos de processos modelados e as condições em que estes processos são representados, a escala de sua utilização e os tipos de informações de saída que eles fornecem (MERRITT et al., 2003).

Atualmente os modelos de erosão tem se beneficiado com os recursos computacionais oferecidos pelos sistemas de informações geográficas (SIG) e pela disponibilidade de dados adquiridos por sensoriamento remoto (SR) que apresentam amplo potencial de aplicação na avaliação dos riscos de erosão em larga escala (KING et al., 2005). A grande maioria dos modelos de erosão exigem dados topográficos de entrada necessários para a avaliação das características do terreno que influenciam a erosão, por isto, faz-se necessário conhecer a precisão fornecida pelos dados de sensoriamento remoto para as aplicações na modelagem da erosão (VRIELING, 2006).

2.2.1. Universal Soil Loss Equation

A *Universal Soil Loss Equation* (USLE) ou Equação Universal de Perda de Solo, como é conhecida no Brasil, é um modelo de erosão amplamente utilizado em todo o mundo. Desde a sua primeira versão, apresentada por Wischmeier e Smith (1978), este modelo tem incentivado e contribuído em muitos trabalhos de pesquisa. Devido ao desenvolvimento de novas tecnologias, o modelo USLE foi atualizado para agregar informações adicionais que se tornaram disponíveis após o seu desenvolvimento, a este modelo revisado e atualizado atribuiu-se o nome *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (RENARD et al., 1997). Existem outras variações do modelo USLE que consideram diferentes métodos para o cálculo dos fatores que o compõem, porém destacam-se a *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) (WILLIAMS, 1975) e a *Universal Soil Loss Equation - Modified* (USLE-M) (KINNELL; RISSE, 1998).

No Brasil, o modelo USLE foi adaptado às condições regionais por meio de uma série de experimentos desenvolvidos no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para a parametrização de seus fatores nas condições de solo

e clima do estado de São Paulo, recebendo a denominação de Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985).

A USLE é um modelo mundialmente aceito em função da adequação às condições locais por meio do cálculo de cada fator (clima, solo, relevo, cobertura vegetal e práticas de conservação do solo), de acordo com a disponibilidade de dados para a parametrização de seus fatores. No modelo USLE, assim como nos modelos EUPS e RUSLE, as perdas de solo são estimadas utilizando-se a relação apresentada na Equação 2.3.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.3)$$

Onde 'A' representa a quantidade média de solo perdida em determinada área durante um determinado período de tempo, expressa nas unidades selecionadas para o fator 'K' e período de tempo selecionado para o fator 'R'. No Sistema Internacional de Unidades a perda de solo é comumente expressa em toneladas por hectare ano ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

O fator 'R' ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$) corresponde ao fator de erosividade da chuva (potencial erosivo acumulado das precipitações), calculado com base no índice de erosão da chuva. O índice de erosão ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$) é equivalente ao produto da energia cinética da chuva ($MJ \cdot ha^{-1}$) pela intensidade máxima da chuva em 30 minutos ($mm \cdot h^{-1}$).

O fator 'K' ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$) representa a erodibilidade do solo (resistência aos processos erosivos). É uma relação entre a perda de solo por unidade de índice de erosão. O fator 'K' está relacionado com as propriedades físicas e características mecânicas do solo. Pode ser calculado utilizando-se o nomograma apresentado por Wischmeier e Smith (1978) ou por meio de equações obtidas a partir da regressão linear múltipla de parâmetros físicos e químicos do solo (DENARDIN, 1990).

O fator topográfico compreende o fator 'L' (*slope length factor*) e o fator 'S' (*slope steepness factor*). O fator 'L' é calculado com base no comprimento 'λ' da vertente enquanto que o fator 'S' é calculado com base na declividade 'θ' da mesma. Este fator é adimensional, pois consiste na relação entre as perdas de solo observadas em diferentes condições topográficas de campo e padrões de experimentação ($\lambda = 22,1\text{m}$ e $\theta = 9\%$).

O fator 'C' relaciona-se à cobertura vegetal, enquanto que o fator 'P' considera as práticas conservacionistas utilizadas ou não. Estes fatores também são adimensionais, pois representam a relação entre as perdas de solo associadas a determinadas culturas agrícolas e práticas de conservação em relação às perdas de solo associadas a uma área com as mesmas características de clima, solo e topografia, porém lavrada e considerando a prática de plantios em declive.

A perda de solo estimada pela USLE considera os sedimentos deslocados de uma vertente, removidos pelo escoamento do fluxo superficial da água e depositados no canal escoadouro. Apenas o solo perdido por erosão laminar pode ser estimado pela USLE, pois os dados empíricos utilizados para o desenvolvimento da equação não abrangem os processos erosivos em voçorocas e movimentos de massa. Apesar de parte do sedimento removido permanecer no campo, a USLE considera esta fração como solo perdido pela erosão (MERRITT et al., 2003).

Entretanto, apesar das limitações do modelo, esta equação pode ser utilizada como guia para o planejamento do uso do solo e determinação das práticas de conservação mais apropriadas a uma dada área considerando a tolerância de perda de solo. Além disto, os fatores 'R', 'K', 'L' e 'S' da USLE podem ser empregados para a determinação do Potencial Natural de Erosão (PNE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985).

2.2.1.1. Cálculo do fator topográfico

Desde as primeiras tentativas para modelar os processos erosivos, as características topográficas das vertentes são consideradas no equacionamento do potencial de erosão do escoamento superficial da água (LAFLEN; MOLDENHAUER, 2003). Originalmente, o fator topográfico 'LS' da USLE é calculado com base no comprimento ' λ ' e na declividade ' θ ' da vertente, conforme ilustrado na Figura 2.1.

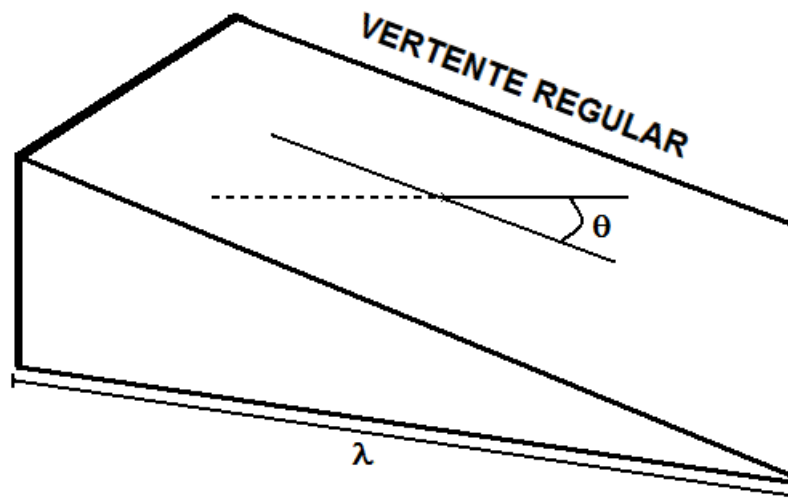


Figura 2.1 – Representação do ângulo de declividade ' θ ' e do comprimento de rampa ' λ ' em uma vertente regular planar retilínea.

Deste modo, Wischmeier e Smith (1978) propõem a utilização da Equação 2.4 para estimar o fator topográfico 'LS' em uma vertente regular. Onde ' λ ' corresponde ao comprimento horizontal da vertente em metros, ' θ ' é o ângulo de declividade em graus e o expoente ' m ' assume o valor 0,2 para vertentes com declividades menores que 1%, 0,3 para declividades entre 1% a 3%, 0,4 para declividades entre 3% a 5% e 0,5 para declividades maiores que 5%.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \times (65,41 \operatorname{sen}^2 \theta + 4,56 \operatorname{sen} \theta + 0,065) \quad (2.4)$$

Entretanto, a Equação 2.4 não se aplica ao cálculo do fator topográfico 'LS' em vertentes irregulares, ou seja, com diferentes declividades ao longo da vertente. Para calcular o fator topográfico em vertentes irregulares Foster e Wischmeier (1974) propõem a segmentação da vertente irregular em segmentos com declividade homogênea, conforme representado na Figura 2.2.

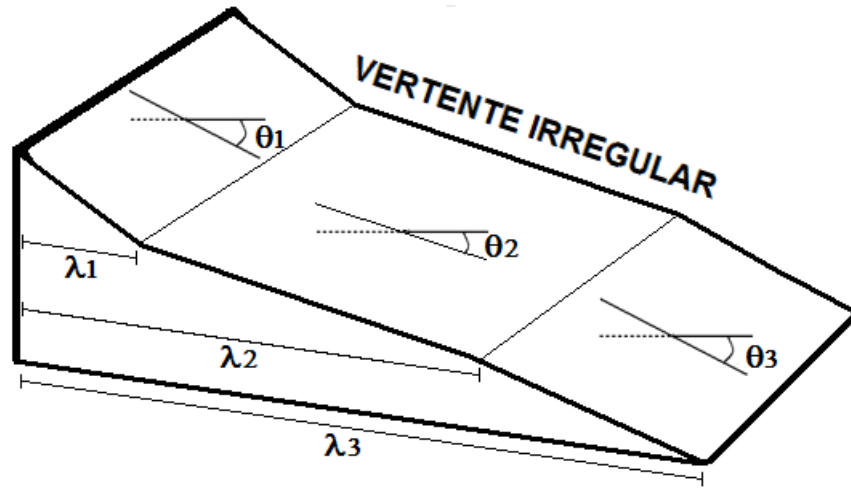


Figura 2.2 – Representação dos diferentes ângulos de declividade (θ_1 , θ_2 e θ_3) e dos respectivos comprimentos de rampa (λ_1 , λ_2 e λ_3) em uma vertente irregular retilínea.

Sendo assim, de acordo com Foster e Wischmeier (1974), a Equação 2.5 pode ser empregada para calcular o fator topográfico 'LS' em vertentes irregulares. Onde ' S_j ' corresponde ao fator 'S' calculado com base no ângulo de declividade do segmento ' j ' e ' λ_j ' ao comprimento de rampa medido do divisor de águas até a jusante do segmento ' j '.

$$LS = \sum_{j=1}^N \frac{S_j \lambda_j^{m+1} - S_j \lambda_{j-1}^{m+1}}{(\lambda_j - \lambda_{j-1}) 22,13^m} \quad (2.5)$$

Com o aperfeiçoamento das equações empregadas para o cálculo do fator topográfico, o expoente ' m ' passou a ser calculado com base na razão ' β ', relacionada à proporção da erosão em sulcos (causada pelo escoamento superficial) e a erosão entre sulcos (causada, principalmente, pelo salpicamento das gotas de chuva). De acordo com Mc Cool et al. (1989) o expoente ' m ' pode ser calculado por meio da Equação 2.6 e, para solos susceptíveis tanto à erosão em sulcos como à erosão entre sulcos, a razão ' β ' pode ser calculada com base no ângulo de declividade ' θ ' por meio da Equação 2.7.

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{(\text{sen } \theta / 0,0896)}{[3(\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56]} \quad (2.7)$$

Conforme apresentado por Mc Cool et al. (1987), o cálculo do fator ' S ' passou a empregar diferentes equações segundo o limiar de declividade. Deste modo, para vertentes com declividades inferiores a 9% o fator ' S ' passou a ser calculado utilizando a Equação 2.8, enquanto que para declividades maiores ou iguais a 9% passou a ser calculado utilizando a Equação 2.9.

$$S = 10,8 \text{ sen } \theta + 0,03 \quad (2.8)$$

$$S = 16,8 \text{ sen } \theta - 0,50 \quad (2.9)$$

No entanto, a Equação 2.9 não foi desenvolvida considerando vertentes com declividades acima de 22%. Deste modo, Nearing (1997) desenvolveu uma função única, adequada ao cálculo do fator ' S ' em diferentes condições de declividade, descrita pela Equação 2.10.

$$S = -1,5 + \left(\frac{17}{1 + e^{[2,3 - 6,1(\sin \theta)]}} \right) \quad (2.10)$$

Considerando declividades menores que 22% (~12°), as equações propostas por Mc Cool et al. (1987) para o cálculo do fator 'S' apresentam resultados semelhantes à equação apresentada por Nearing (1997). Contudo, para declividades superiores a 22% as diferenças entre as equações são consideráveis, conforme ilustrado na Figura 2.3.

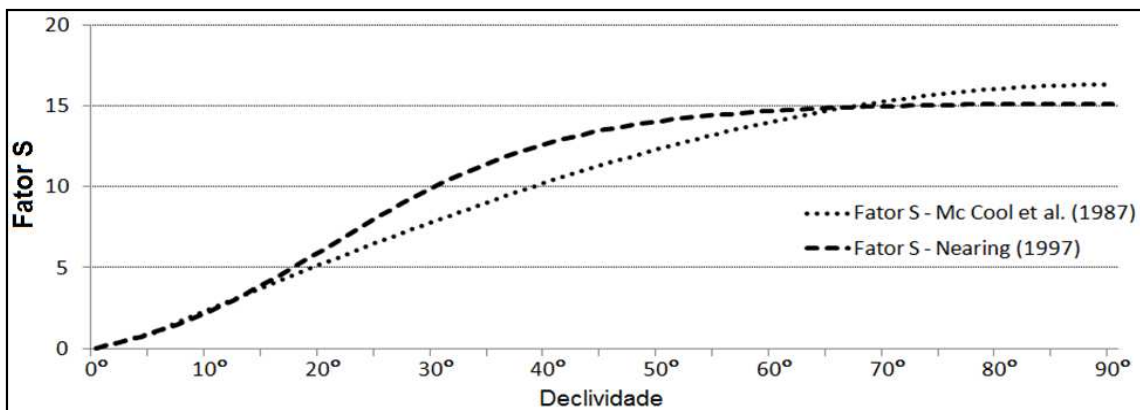


Figura 2.3 – Representação gráfica das funções para o cálculo do fator 'S', com base no ângulo de declividade.

Fonte: Adaptado de Mc Cool et al. (1987) e Nearing (1997)

As equações para o cálculo do fator topográfico da USLE são derivadas de dados empíricos e, por isto, podem apresentar resultados inapropriados quando utilizadas para a modelagem da erosão em áreas com topografias diferentes das condições experimentais em que as equações foram desenvolvidas. Deste modo, a modelagem do fator topográfico deve considerar as condições topográficas das vertentes a serem modeladas.

Para a modelagem da erosão em bacias hidrográficas deve-se considerar a influência da topografia sobre os processos erosivos causados pela concentração do escoamento superficial ao longo das vertentes. De acordo

com Kirkby e Chorley (1967), em áreas com topografia variada o comprimento da vertente é uma variável pouco importante na determinação das zonas de fluxo máximo nas encostas. Outras variáveis parecem assumir uma importância muito maior em sua influência sobre a erosão. A variação da área de captação é considerada um parâmetro significativo para a determinação das zonas de concentração do fluxo. Assim, deve-se considerar a curvatura do terreno produzindo zonas de convergência ou divergência, sendo essencial avaliar a forma tridimensional da vertente ao invés de perfis de inclinação em duas dimensões.

Além disto, a relação entre os processos erosivos e o comprimento da vertente é genuinamente empírica, faltando-lhe embasamento físico e fundamentos teóricos que justifiquem sua utilização na modelagem da erosão de vertentes com características topográficas variadas. Sendo assim, buscando desenvolver um fator topográfico apropriado à modelagem da erosão em vertentes com diferentes condições de topografia, Moore e Burch (1986) propõem a modificação do fator 'L', sugerindo a utilização de uma variável que considere a forma da área de captação, conforme ilustrado na Figura 2.4.

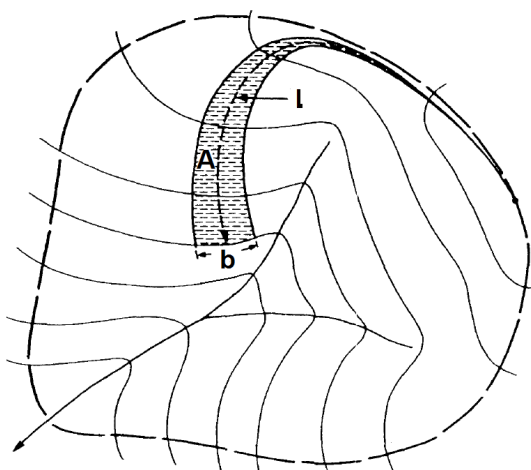


Figura 2.4 – Representação esquemática da área de captação 'A', comprimento do fluxo 'l' e largura do fluxo 'b',

Fonte: Moore e Burch (1986)

Assim, de acordo com Moore e Burch (1986), o fator 'L' pode ser calculado considerando a forma da área de captação por meio da Equação 2.11, onde a variável 'a' descreve a forma da captação e a variável 'l' o comprimento do fluxo.

$$L = \left(\frac{a l}{22,13} \right)^m \quad (2.11)$$

Assim, sendo a forma da captação 'a' descrita pela Equação 2.12 e a área de captação específica 'As' descrita pela Equação 2.13, onde 'A' corresponde à área de captação e 'b' à largura do fluxo, pode-se reescrever a Equação 2.11 utilizando a variável área de captação específica 'As', conforme apresentado na Equação 2.14.

$$a = A/bl \quad (2.12)$$

$$As = A/b \quad (2.13)$$

$$L = \left(\frac{As}{22,13} \right)^m \quad (2.14)$$

Segundo Moore e Wilson (1992), em uma vertente bidimensional onde não ocorra convergência ou divergência do fluxo, a forma da captação 'a' tem valor 1 e a área de captação específica 'As' é equivalente ao comprimento da vertente 'λ'. Sendo assim, empregando o conceito de área de captação específica 'As' para a modelagem do fator topográfico, Desmet e Govers (1996a) propõem o cálculo automatizado do fator 'L' com base no MDE por meio da Equação 2.15.

$$L = \frac{(A + D^2)^{m+1} - A^{m+1}}{\alpha^m \times D^{m+2} \times 22,13^m} \quad (2.15)$$

Deste modo, 'A' equivale à área de captação, ou seja, a área total capaz de contribuir para o montante do fluxo do escoamento superficial que atinge determinada célula do MDE, 'D' corresponde ao espaçamento da grade do MDE e 'α' ao fator de correção da largura do fluxo, calculado a partir do ângulo de aspecto 'φ' por meio da Equação 2.16.

$$\alpha = |\sin \phi| + |\cos \phi| \quad (2.16)$$

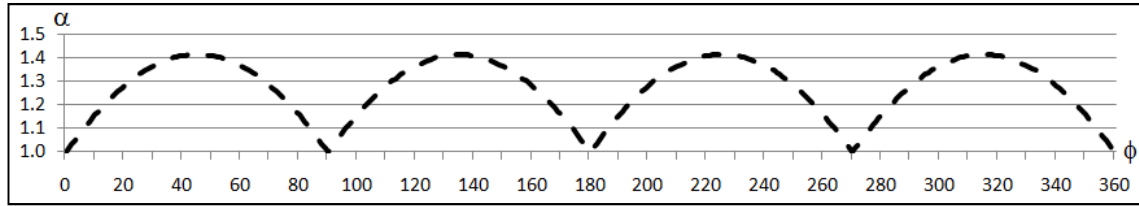


Figura 2.5 – Representação gráfica da função para o cálculo do fator de correção da largura do fluxo 'α', com base no ângulo de aspecto 'φ'

O ângulo de aspecto 'φ', também conhecido como ângulo de orientação de vertentes, corresponde ao ângulo formado entre o norte e a direção do declive, conforme ilustrado na Figura 2.6. Desta forma, a largura do fluxo 'b' em determinada célula do MDE, pode ser estimada por meio da Equação 2.17.

$$b = \alpha D \quad (2.17)$$

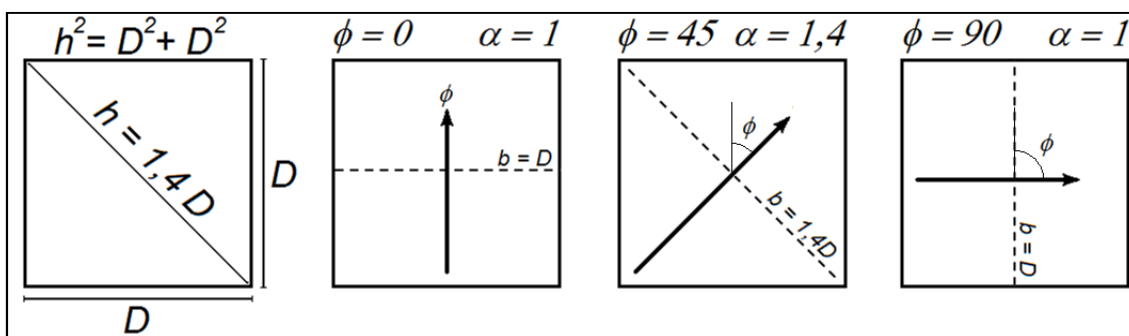


Figura 2.6 – Representação gráfica da largura do fluxo ‘b’ em células com espaçamento de grade ‘D’ e diferentes ângulos de aspecto ‘ ϕ ’ (0°, 45° e 90°)

Ainda que o cálculo do fator topográfico possa ser realizado manualmente (FERNÁNDEZ, 1996; GAMEIRO, 1997), o cálculo automatizado do fator topográfico com base nas variáveis topográficas extraídas a partir do MDE possibilita estimativas padronizadas e isentas de critérios subjetivos associados à necessidade de interpretação visual das linhas de fluxo (DESMET; GOVERS, 1996a).

Embora existam outros métodos automatizados para o cálculo do fator topográfico com base no MDE (VALERIANO, 1999; 2002a), a abordagem fundamentada na área de captação específica vem sendo amplamente utilizada em estudos de modelagem da erosão (OOST et al., 2000; KINNEL, 2005; VERSTRAETEN, 2006; LOPES et al., 2007; OLIVEIRA et al. 2010).

2.3. Modelo Digital de Elevação

A representação computacional de dados nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) pode ser realizada utilizando a estrutura de dados vetorial ou matricial. Os dados altimétricos são comumente armazenados utilizando a estrutura matricial, porém, podem ser representados utilizando estruturas vetoriais empregando pontos esparsos constituídos de pares ordenados XYZ, onde XY é uma localização no plano e Z um valor numérico de altitude, ou por

meio de linhas regularmente espaçadas (isolinhas) associadas aos valores de altitude (CÂMARA, 2005).

A superfície do terreno pode ser representada utilizando a estrutura vetorial de dados por meio da malha triangular irregular ou a estrutura matricial empregando grades regulares. Nas grades regulares o espaço XYZ é utilizado como sistema de coordenadas de referência para a superfície, cada vértice representa uma coordenada no plano XY e um valor de elevação Z, deste modo, a estrutura de armazenamento da grade regular pode ser formada por uma matriz de valores de elevação. A malha triangular irregular ou *Triangular Irregular Network* (TIN) é uma estrutura vetorial com topologia do tipo arco-nó que representa a superfície utilizando um conjunto de faces triangulares irregulares interligadas (NAMIKAWA, 1995), conforme representado na Figura 2.7.

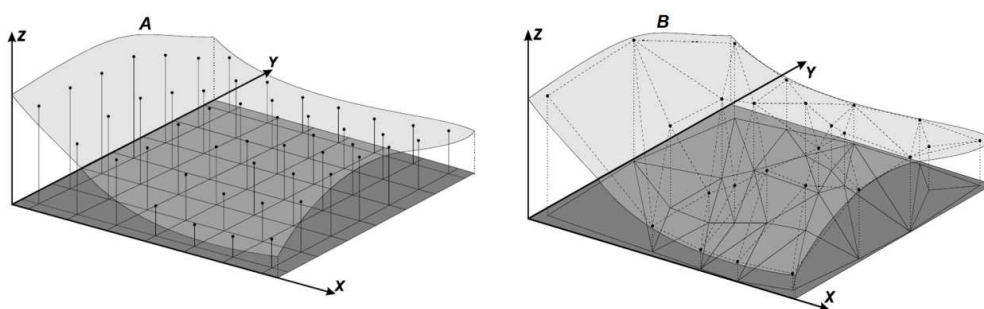


Figura 2.7 – Superfície representada em grade regular (A) e TIN (B)

Fonte: Namikawa (1995).

As grades regulares empregadas para a representação computacional da superfície do terreno podem ser denominadas Modelos Numéricos do Terreno (MNT) (CÂMARA, 2005) quando os valores da grade correspondem à altitude do terreno, Modelos Digitais de Elevação (MDE) quando os valores da grade compreendem valores de altitude do terreno e dos demais elementos presentes na superfície (dosséis arbóreos, edificações...), Modelos Digitais do Terreno

(MDT) e Modelo Digitais de Superfície (MDS) quando os valores da grade correspondem à altitude da superfície do terreno (DOYLE, 1978; MAUNE, 2007), entre outros. Deste modo, optou-se por utilizar o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) para designar a representação computacional da superfície terrestre por meio de uma grade regular.

Desde que foram apresentados por Miller e Laflamme (1958), os MDE vêm sendo utilizados para análise do relevo e cálculo de variáveis topográficas. Os MDE armazenam os dados altimétricos em uma estrutura matricial constituída por uma grade de pontos organizados em linhas e colunas regularmente espaçadas. Deste modo a intersecção das linhas e colunas distinguem as células do MDE, conforme apresentado na Figura 2.8.

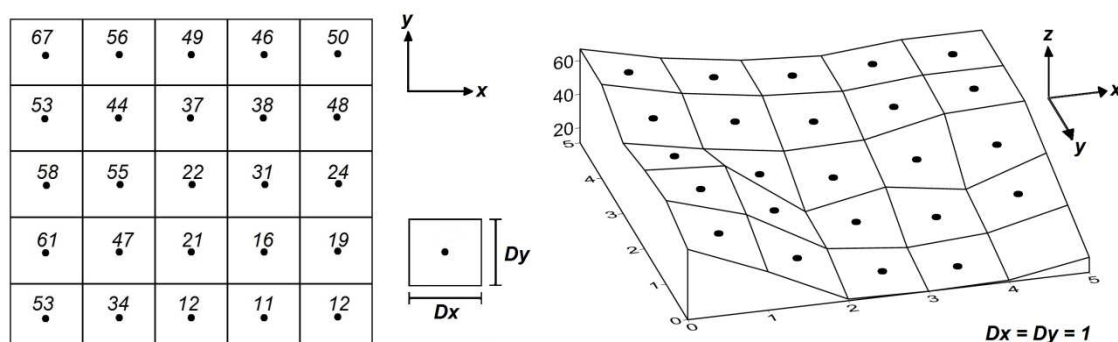


Figura 2.8 – Representação da estrutura do Modelo Digital de Elevação

O espaçamento da grade do MDE origina células retangulares quando $Dx \neq Dy$ e células quadrangulares quando $Dx = Dy$. O espaçamento da grade influencia na capacidade de representação da superfície e pode omitir características importantes do terreno devido à limitação inerente ao espaçamento uniforme das células.

Os dados para elaboração dos MDE podem ser obtidos a partir de mapas altimétricos, estereomodelos fotogramétricos, levantamentos terrestres, sensores óticos, *Light Detection And Ranging* (LIDAR) e radares a bordo de

aviões, espaçonaves ou satélites (DOYLE, 1978; KING et al., 2005). Os MDE podem apresentar erros variados de acordo com as fontes de origem e métodos de interpolação dos dados, fazendo-se necessário conhecer os possíveis problemas inerentes a cada MDE (FISHER; TATE, 2006; CHAPLOT et al., 2006).

Contudo, os MDE são computacionalmente eficientes para a manipulação dos dados georreferenciados em função de sua simples estrutura topológica (MAUNE, 2007). Além disto, constituem uma rica fonte de dados para a modelagem da erosão, pois contêm informações básicas de altitude que permitem derivar outras variáveis topográficas que influenciam os processos erosivos (MOORE et al., 1988; POST et al., 2001; KING et al., 2005; VRIELING, 2006).

Os MDE podem ser avaliados comparando-se os atributos do terreno avaliados a partir da superfície modelada com pontos coletados em campo ou mesmo por meio de comparações com dados cartográficos e MDE de maior precisão. Para realizar estas comparações, são frequentemente utilizadas medidas de desvio padrão, erro quadrático médio, análise de resíduos, análise de histogramas, diferença entre grades, entre outros (VALERIANO, 1999; BUNDELA, 2004).

2.3.1. MDE derivados de dados cartográficos

Os mapas planialtimétricos apresentam um grande potencial para geração de modelos digitais do terreno. As isolinhas e os pontos cotados que representam as formas do relevo em mapas planialtimétricos podem fornecer informações importantes à modelagem de superfícies. A qualidade das informações altimétricas contidas nos dados cartográficos variam de acordo com a escala de representação do terreno e com a precisão do levantamento cartográfico.

Compete à Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) e ao IBGE a construção das bases cartográficas relativas às escalas de mapeamento sistemático de 1:1.000.000 a 1:25.000, bem como a fiscalização e a qualificação de bases cartográficas geradas por outras organizações.

Aos órgãos estaduais e municipais compete a construção de cartas cadastrais com escalas variando de 1:10.000 até 1:2.000 ou maiores (BRASIL, 1967). No estado de São Paulo o IGC tem como objetivo promover o conhecimento do território paulista, dedicando-se à cartografia de detalhe e precisão. Entretanto, a disponibilidade de informações cartográficas planialtimétricas para o território nacional é limitada apenas a algumas regiões.

As normas técnicas da cartografia nacional classificam as cartas quanto à sua exatidão de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC (BRASIL, 1984; 2005). O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. De acordo com as normas técnicas da cartografia nacional, noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido, assim como noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de isolinhas, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC Altimétrico estabelecido pela classificação da carta.

Deste modo, um mapa planialtimétrico de classe A tem o PEC planimétrico de 0,5 mm na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente e PEC altimétrico correspondente à 1/2 da equidistância entre as isolinhas, sendo de 1/3 desta equidistância o Erro-Padrão correspondente. A classe B tem o PEC planimétrico de 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm o Erro-Padrão correspondente e PEC altimétrico equivalente a 3/5 da equidistância, sendo de dois quintos o Erro-Padrão. A classe C tem o PEC planimétrico de 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm o Erro-Padrão e o

PEC altimétrico de $\frac{3}{4}$ da equidistância, sendo de $\frac{1}{2}$ desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

O método usual para geração de MDE a partir de mapas planialtimétricos consiste em vetorizar as isolinhas e os pontos cotados para em seguida gerar uma superfície por meio da interpolação dos elementos vetorizados. Trata-se de um processo trabalhoso e cansativo que apresenta alta probabilidade de erros, por omissão ou duplicação de dados (DOYLE, 1978). Tradicionalmente os MDE têm sido obtidos a partir da vetorização dos mapas topográficos (VRIELING, 2006). Uma limitação desta fonte de dados é que as bases cartográficas não são atualizadas regularmente, além disto, os MDE derivados de mapas altimétricos podem apresentar erros devido ao processo de interpolação (WISE, 2000). Outra restrição é a disponibilidade de mapas altimétricos com escala adequada para a geração de MDE aplicados à modelagem do terreno.

A definição do espaçamento da grade dos MDE gerados a partir dos dados cartográficos não deve ultrapassar o limite estabelecido pela cartografia de 0.2mm na escala da carta, referente à acuidade visual definida como a habilidade dos olhos para detectar pequenos objetos ou detalhes espaciais e para discriminar entre objetos adjacentes. A acuidade visual é expressa como o tamanho mínimo de um objeto que pode ser detectado a certa distância de leitura em determinadas condições de contraste. De acordo com esta restrição cartográfica, o espaçamento mínimo da grade para representação de uma informação na escala 1:10.000 seria de 2 m, enquanto que para a escala de 1:50.000 seria de 10 m (FERNANDES; MENEZES, 2005).

2.3.2. MDE derivados de dados de Sensoriamento Remoto orbital

Atualmente, existem opções para extrair MDE de boa qualidade a partir de dados obtidos por sensores remotos (TOUTIN; GRAY, 2000; KING et al., 2005;

VRIELING, 2006). Como exposto anteriormente, no presente trabalho é proposta a análise dos MDE gerados com base nos dados obtidos por sensores remotos ópticos (ASTER GDEM) e radar (SRTM), disponibilizados publicamente na internet. Diversos estudos realizaram avaliações destes modelos para fins de mapeamento topográfico e apontaram os benefícios da utilização destes dados (BUNDELA, 2004; OLIVEIRA, 2005; CAMARGO et al., 2009).

Os MDE gerados a partir dos dados obtidos por SR orbital podem ser avaliados de acordo com a precisão planialtimétrica, com base na escala de representação da informação, utilizando o PEC. Esta classificação permite relacionar a precisão oferecida pelos MDE obtidos por SR aos dados cartográficos. Diversos trabalhos avaliaram os dados SRTM quanto à adequação ao PEC, indicando o potencial para geração de mapas com classe A na escala 1:100.000 (SANTOS et al. 2005; MEDEIROS et al., 2009; COSTA et al., 2010). Há também estudos localizados onde os dados SRTM atendem o PEC para a classe A até mesmo para a escala de 1:30.000 (HIGA et al., 2006).

A precisão cartográfica oferecida pelos dados ASTER GDEM ainda é pouco estudada. Sabe-se que os dados ASTER GDEM apresentam potencial para geração de mapas classe A para a escala de 1:100.000 (RODRIGUES et al., 2010). Porém, em áreas montanhosas a precisão cartográfica de MDE gerados por meio de pares estéreo de imagens ASTER pode ser adequada, de acordo com o PEC, para escalas de 1:50.000 classe B (CAMARGO et al., 2009).

2.3.2.1. Shuttle Radar Topography Mission

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi um projeto cooperativo entre o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), da *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) do Departamento de Defesa dos Estados Unidos, junto às agências espaciais da

Alemanha e da Itália, respectivamente *Deutschen Zentrum für Luft - und Raumfahrt* (DLR) e *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI) (NASA, 2011).

Os sistemas sensores da SRTM foram lançados a bordo do ônibus espacial *Endeavor*, a uma altitude de 223 km e inclinação orbital de 57°. O sistema coletou dados interferométricos utilizando dois conjuntos de sensores bandas C e X separados por um mastro de 60 metros, para aquisição dos dados topográficos da superfície terrestre entre as latitudes 60° norte e 56° sul, durante o mês de fevereiro de 2000 (RABUS et al, 2003).

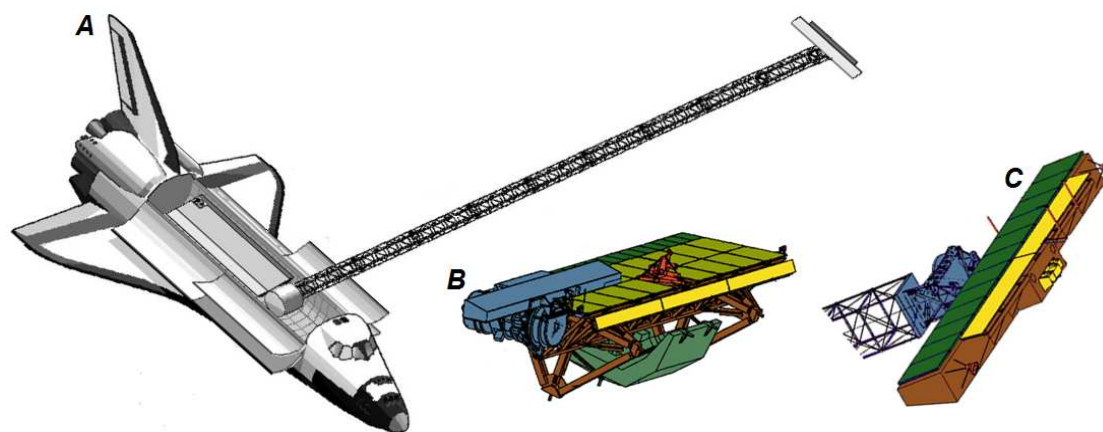


Figura 2.9 – Ônibus espacial Endeavor (A) e sensores banda C (verde) e banda X (amarelo) presentes nas antenas principal (B) e externa (C)

Fonte: NASA (2011).

Os dados da banda C cobrem 119 milhões de km² e foram processados pelo JPL da NASA, enquanto que os dados da banda X cobrem 58 milhões de km² e foram processados pelo DLR. Os dados SRTM banda C com 1 arco-segundo de resolução ($\pm 30\text{m}$) são limitados ao território dos Estados Unidos, enquanto que os dados com 3 arcos-segundo ($\pm 90\text{m}$) são publicamente disponíveis para todo território brasileiro e 80% da superfície terrestre do globo. Os dados estão referenciados ao geoide *World Geodetic System* (WGS84) (RABUS et al., 2003; SLATER et al., 2006).

As fontes interferométricas de erros e os erros aleatórios foram estimados, calibrados e compensados com propósito de atingir as especificações da *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA). As especificações de exatidão vertical foram $\pm 16\text{m}$ para altitude absoluta e $\pm 6\text{m}$ para altitude relativa, sendo que o erro absoluto é calculado em relação ao conjunto total dos dados e o relativo se refere ao erro em uma escala local de 200 km. Os resultados da avaliação dos dados SRTM para América do Sul apresentaram erro absoluto de localização de 9,0m, erro absoluto de altitude de 6,2m e erro relativo de altitude de 5,5m (RABUS et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2006).

É importante considerar que os valores de altitude apresentados nos dados SRTM representam as superfícies refletivas (dossel de árvores, telhados de edificações etc.) podendo ocultar as feições topográficas da superfície do terreno, conforme apresentado na Figura 2.10 (VALERIANO et al., 2006). Por isto, devem ser feitas avaliações da exatidão local dos dados (RABUS et al., 2003; SLATER et al., 2006).

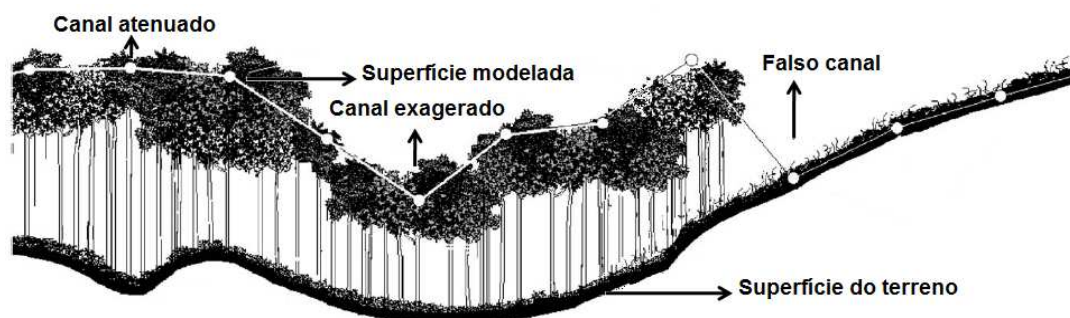


Figura 2.10 – Efeitos causados pelo dossel da vegetação nos dados SRTM
Fonte: Valeriano et al. (2006).

2.3.2.2. Global Digital Elevation Model

Os dados denominados *Global Digital Elevation Model* (GDEM) obtidos pelo sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) são parte do projeto desenvolvido pelo Ministério da Economia,

Comércio e Indústria do Japão em conjunto com a NASA. O ASTER GDEM é uma contribuição ao *Global Earth Observation System of Systems* (GEOSS) e está disponível publicamente aos usuários desde junho de 2009.

O sensor ASTER foi lançado a bordo do satélite da NASA denominado Terra, em Dezembro de 1999. Este sistema sensor cobre o espectro do visível ao infravermelho termal através de 14 bandas, distribuídas nos subsistemas *Visible and Near-InfraRed* (VNIR), *Short Wave InfraRed* (SWIR) e *Thermal InfraRed* (TIR) (NASA, 2011). Os dados GDEM são obtidos a partir do par estereoscópico de imagens do infravermelho próximo geradas no subsistema VNIR por meio de dois sensores, um dirigido ao nadir e o outro dirigido para traz, conforme ilustrado na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Satélite Terra (A) e subsistema VNIR (B) com sensores de visada nadir (verde) e retrovisada (azul)

Fonte: NASA (2011).

Conforme relatado por ASTER GDEM Validation Team (2009), a metodologia utilizada para produzir o GDEM envolveu o tratamento automatizado de 1,5 milhões de cenas do arquivo ASTER, incluindo a formação do par estéreo para produzir 1.264.118 cenas individuais. Foram realizados processamentos visando remover os ruídos causados por nuvens e anomalias residuais.

O GDEM cobre a faixa compreendida entre 83° norte e 83° sul, abrangendo 99% da superfície terrestre, maior que a faixa abrangida pelo SRTM. Está no formato GeoTIFF com coordenadas geográficas e resolução de 1 arco-segundo ($\pm 30\text{m}$) e referenciado ao geoide *Earth Gravitational Model* (EGM96). A precisão global estimada, mas não garantida, para este produto foi de 20m na vertical e de 30m na horizontal, com 95% de confiança.

2.4. Análise do terreno com base no MDE

A análise do terreno compreende a manipulação dos dados altimétricos visando obter as variáveis topográficas adequadas às necessidades de cada aplicação. A análise do terreno é baseada na superfície do MDE formada por uma matriz de valores de altitude que abrange a área em questão e nas variáveis topográficas extraídas a partir desta superfície (WILSON; GALLANT, 2000; LI et al., 2005). Para calcular o fator topográfico 'LS' com base no MDE são necessárias as variáveis topográficas: declividade ' θ ', aspecto ' ϕ ' e área de captação 'A'.

A análise das variáveis topográficas e do fator topográfico, calculados com base no MDE, deve atentar à questão da autocorrelação dos dados. A autocorrelação espacial representa a relação espacial de uma variável e pode caracterizar a redundância de informação entre as realizações de um fenômeno que normalmente distorce as estatísticas da distribuição da variável (CAI; WANG, 2006).

2.4.1. Processamento dos dados altimétricos

O processamento dos dados altimétricos visando à geração do MDE para a modelagem da erosão é de fundamental importância. Entretanto, é necessário conhecer as implicações de cada etapa de processamento de modo a avaliar os efeitos causados na estrutura original dos dados altimétricos. Os processos

de importação, exportação e conversão dos dados devem ser cuidadosamente realizados para garantir a integridade dos mesmos (FISHER; TATE, 2006).

O processo de interpolação dos dados altimétricos para a geração da grade regular que caracteriza a superfície do MDE exerce grande influência na análise das características topográficas do terreno, por isto deve ser realizado de acordo com a estrutura do dado altimétrico a ser interpolado. A Krigagem é um método geoestatístico de estimação de variáveis espacializadas que utiliza informações observadas no estudo da variabilidade espacial dos dados. A geoestatística apresenta-se como uma ferramenta para a análise da variabilidade espacial dos dados altimétricos, disponível em diversos aplicativos e SIG (OLIVER; WEBSTER, 1990). Desta forma, a Krigagem é utilizada para a interpolação e refinamento dos dados altimétricos estruturados em grades regulares (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010; VALERIANO; ROSSETTI, 2010).

A análise geoestatística que antecede à Krigagem é baseada na variabilidade espacial de uma variável. Os semivariogramas são representações gráficas da variabilidade espacial de uma variável que possibilitam ajustar modelos teóricos, definidos pelo tipo de modelo e pelos coeficientes numéricos: alcance, patamar e efeito pepita, de modo a selecionar os parâmetros para a interpolação dos dados altimétricos. O alcance é a distância a partir da qual cessa o incremento da variância estimada, que atinge um valor de patamar. O patamar atingido corresponde à variância máxima dos dados. O efeito pepita é a estimativa de semivariância para a distância zero e corresponde à parte da variabilidade não explicada pela distribuição espacial dos dados (CRESSIE, 1990).

Embora a Krigagem possa ser utilizada para a geração de MDE a partir da interpolação dos dados altimétricos derivados de bases cartográficas (VALERIANO, 2002b), existem métodos específicos para a interpolação das

isolinhas e pontos cotados vetorizados de mapas altimétricos. Dentre estes, destaca-se o método especificamente projetado para criar MDE corrigidos hidrologicamente (HUTCHINSON, 1989). Este método utiliza informações inerentes aos dados cartográficos digitalizados para construir um modelo de drenagem generalizada. Através da identificação de áreas de máxima curvatura local em cada contorno, as áreas de declividade mais acentuada são identificadas e uma rede de drenagem é gerada. Esta informação é usada para adequar as propriedades hidrológicas do MDE resultante do processo de interpolação, removendo as células capazes de interromper o fluxo modelado.

Entretanto, apesar de alguns métodos de interpolação considerarem a remoção das células capazes de influenciar na distribuição do fluxo, o pré-processamento dos MDE visando a adequação à modelagem hidrológica é fundamental para assegurar a continuidade do fluxo sobre a superfície do MDE. Portanto, a necessária correção de células capazes de interromper o fluxo modelado é realizada após a identificação das rotas de fluxo e dos eventuais sumidouros ou barreiras presentes na superfície do MDE (HENGL; REUTER, 2009).

2.4.2. Cálculo das variáveis topográficas

A declividade ' θ ' e o aspecto ' ϕ ' são variáveis topográficas derivadas de primeira ordem, pois são calculadas a partir da derivação dos valores de altitude contidos no MDE. São também denominadas de variáveis locais, pois são avaliadas com base nos valores de altitude da vizinhança local. A declividade ' θ ' é a primeira derivada da altitude em função da distância, em qualquer direção, e indica a taxa de variação da altitude no ponto. O aspecto ' ϕ ' é o ângulo formado, no sentido horário, entre o norte e a direção de maior declive.

Assim, dada a matriz 3 x 3 com valores de altitude 'Z', representada na Figura 2.12, as variáveis topográficas locais podem ser calculadas no ponto 'Z5', com base nos valores de altitude da vizinhança.

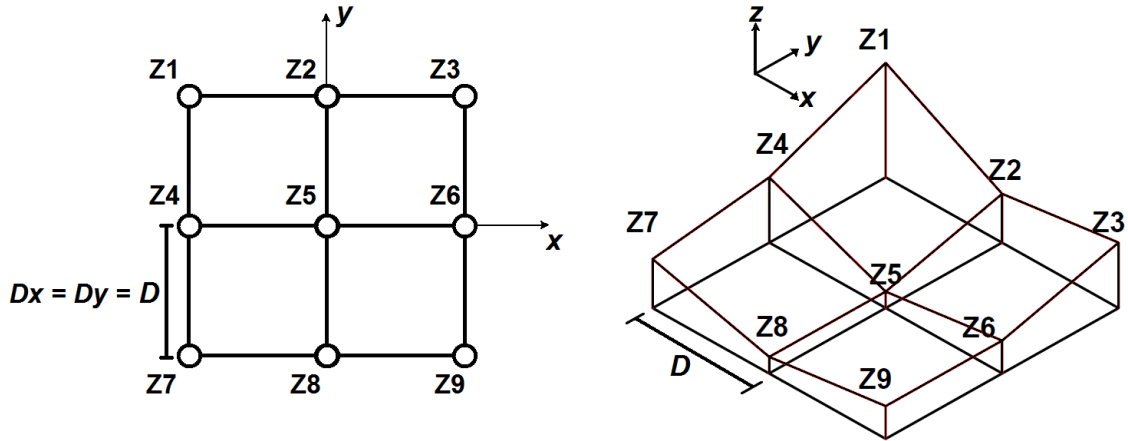


Figura 2.12 – Matriz 3 x 3 com valores de altitude 'Z' e espaçamento 'D'

Deste modo, segundo o método proposto por Zevenbergen e Thorne (1987), o ângulo de declividade 'θ' pode ser obtido pela Equação 2.17 enquanto que o ângulo de aspecto 'φ' é calculado com base na Equação 2.18.

$$\theta = \tan^{-1} \left| \sqrt{\left[\frac{(-Z4 + Z6)}{2D} \right]^2 + \left[\frac{(Z2 - Z8)}{2D} \right]^2} \right| \quad (2.17)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{-\left[\frac{(-Z4 + Z6)}{2D} \right]}{-\left[\frac{(Z2 - Z8)}{2D} \right]} = \tan^{-1} \frac{Ry}{Rx} \quad (2.18)$$

O ângulo de aspecto 'φ' depende do quadrante 'Q' do vetor resultante 'R' formado por 'Rx' e 'Ry', conforme ilustrado na Figura 2.13, de tal modo que:

$$\phi = 90^\circ - \phi' \quad IQ \quad (Rx > 0 ; Ry > 0) \quad (2.19a)$$

$$\phi = 270^\circ + |\phi'| \quad IIQ \quad (Rx < 0 ; Ry > 0) \quad (2.19b)$$

$$\phi = 270^\circ - \phi' \quad IIIQ \quad (Rx < 0 ; Ry < 0) \quad (2.19c)$$

$$\phi = 90^\circ + |\phi'| \quad IVQ \quad (Rx > 0 ; Ry < 0) \quad (2.19d)$$

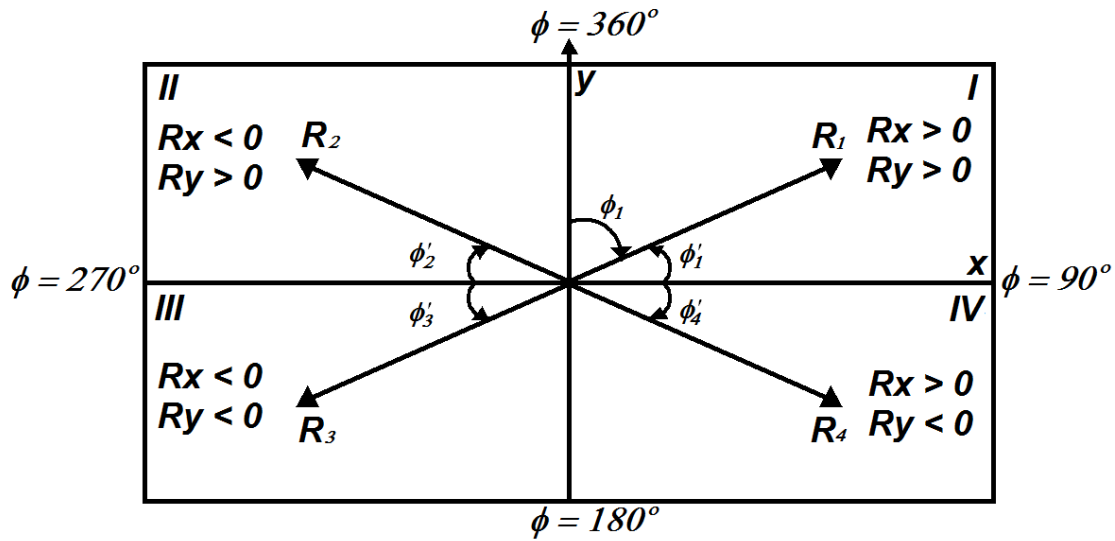


Figura 2.13 – Representação dos vetores resultantes (R_1 , R_2 , R_3 e R_4), seus respectivos ângulos (ϕ'_1 , ϕ'_2 , ϕ'_3 e ϕ'_4) e ângulo de aspecto ϕ_1 de R_1

A área de captação 'A', também denominada área de contribuição, não é uma variável local derivada de primeira ordem e não pode ser calculada utilizando apenas a relação de vizinhança das células do MDE. A área de captação 'A' compreende a área total capaz de captar o fluxo do escoamento superficial e contribuir para o montante do fluxo que atinge determinado ponto. Portanto, para o cálculo da área de captação 'A' é necessário modelar a distribuição do fluxo nas células do MDE.

Diferentes algoritmos podem ser empregados para a modelagem da distribuição do fluxo. Estes se diferenciam em algoritmos de fluxo simples, que transferem todo o fluxo acumulado para apenas uma célula vizinha, e algoritmos de fluxo composto que permitem distribuir o fluxo acumulado para

mais de uma célula vizinha. A principal diferença entre os algoritmos de fluxo simples e composto consiste no potencial que os algoritmos de fluxo composto possuem para modelar, também, o fluxo divergente. Devido ao fato de transferir o fluxo acumulado para apenas uma célula, os algoritmos de fluxo simples possibilitam modelar padrões de fluxo paralelo e fluxo convergente, mas não permitem modelar o fluxo divergente (DESMET; GOVERS, 1996b).

O algoritmo *Deterministic 8 (D8)* apresentado por O'Callaghan e Mark (1984) é um algoritmo de fluxo simples e, por isto, todo o fluxo acumulado em determinado ponto é transferido para apenas um entre os oito pontos da vizinhança. A direção de fluxo é calculada empregando uma máscara 3 x 3 que atribui, ao ponto analisado, um valor convencionado (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128) referente à direção do ponto vizinho de menor altitude e maior gradiente de declividade, conforme ilustrado na Figura 2.14.

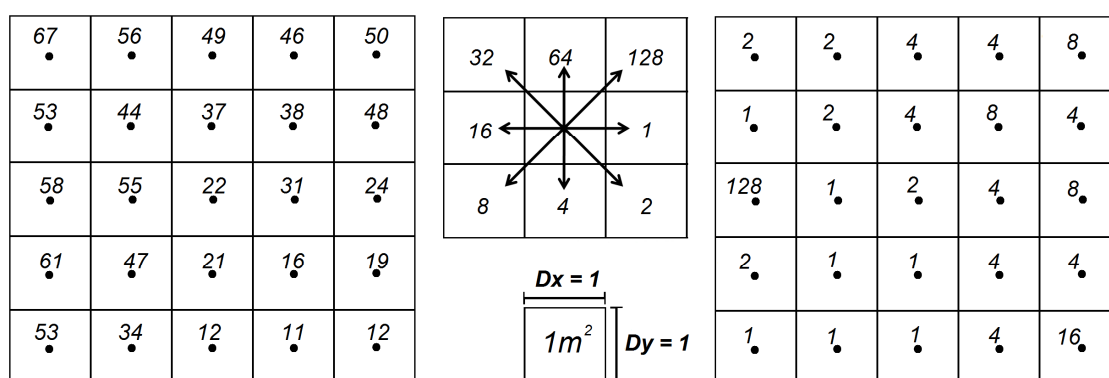


Figura 2.14 – Representação dos valores de altitude da grade do MDE e valores da grade de direção do fluxo calculados com base na máscara 3 x 3

A direção de fluxo é empregada para o cálculo da área de captação. O fluxo acumulado equivale ao número 'n' de células que direcionam o fluxo para determinado ponto. Deste modo, a área de captação 'A' computada pelo algoritmo *D8* corresponde ao somatório da área de todas as células que direcionam o fluxo para determinado ponto, somado à área da célula que

recebe o fluxo acumulado. Portanto, a área de captação 'A' pode ser expressa pela Equação 2.20.

$$A = \sum_{i=0}^{n+1} (Dx \times Dy) \quad (2.20)$$

A direção de fluxo e a área de captação 'A' calculadas por meio do algoritmo D8 com base na grade do MDE representado na Figura 2.14 estão ilustradas na Figura 2.15.

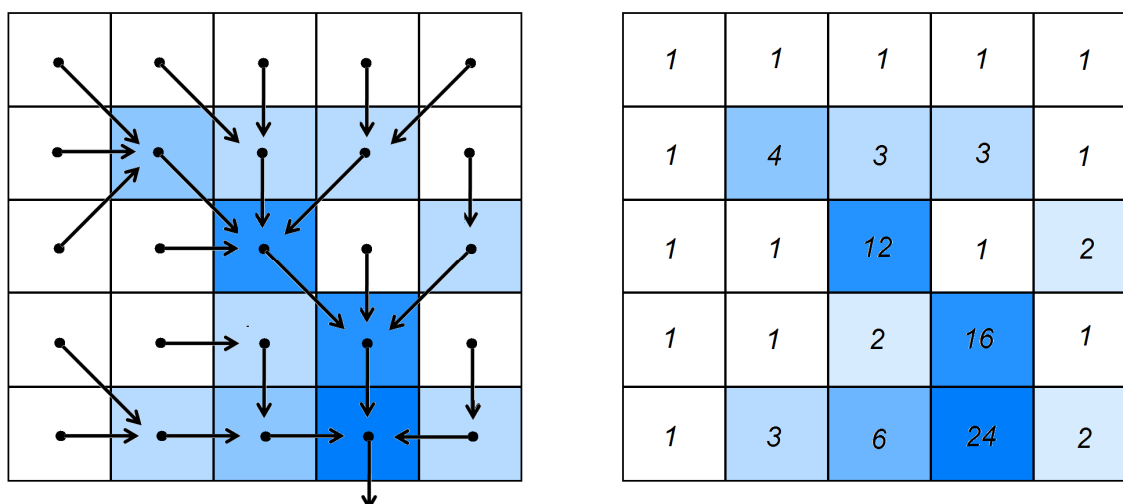


Figura 2.15 – Representação da direção de fluxo e área de captação calculados por meio do algoritmo *Deterministic 8*

O algoritmo *Multiple Flow Direction (MFD)* apresentado por Quinn et al. (1991) e desenvolvido por Freeman (1991) é um algoritmo de fluxo composto e, por isto, o fluxo acumulado em determinado ponto pode ser distribuído entre as oito células da vizinhança. Deste modo, o fluxo acumulado é direcionado para todos os pontos vizinhos com menor valor de altitude, de modo que cada ponto recebe uma proporção equivalente ao gradiente de declividade. Assim, o fluxo acumulado direcionado para determinado ponto 'i' equivale à fração da área de captação destinada à célula 'i' calculada de acordo com a Equação 2.21, onde

' A_i ' corresponde à fração da área de captação destinada à célula ' i ', ' A ' representa a área de captação total a ser dividida entre as células vizinhas, ' θ_i ' é a declividade em relação ao ponto ' i ' e ' θ_j ' corresponde às declividades em relação aos pontos vizinhos incluídos na distribuição do fluxo acumulado.

$$A_i = A \frac{(\tan \theta_i)^{1.1}}{\sum_{j=1}^8 (\tan \theta_j)^{1.1}} \quad (2.21)$$

A área de captação ' A ' é calculada a partir do somatório das frações ' A_i ' do fluxo acumulado das células vizinhas que são direcionadas para determinado ponto, somado à área da célula que recebe o fluxo acumulado.

$$A = (Dx \times Dy) + \sum_{i=0}^8 A_i \quad (2.22)$$

As direções de fluxo e a área de captação ' A ' calculadas por meio do algoritmo *MFD* com base na grade do MDE representado na Figura 2.14 estão ilustradas na Figura 2.16.

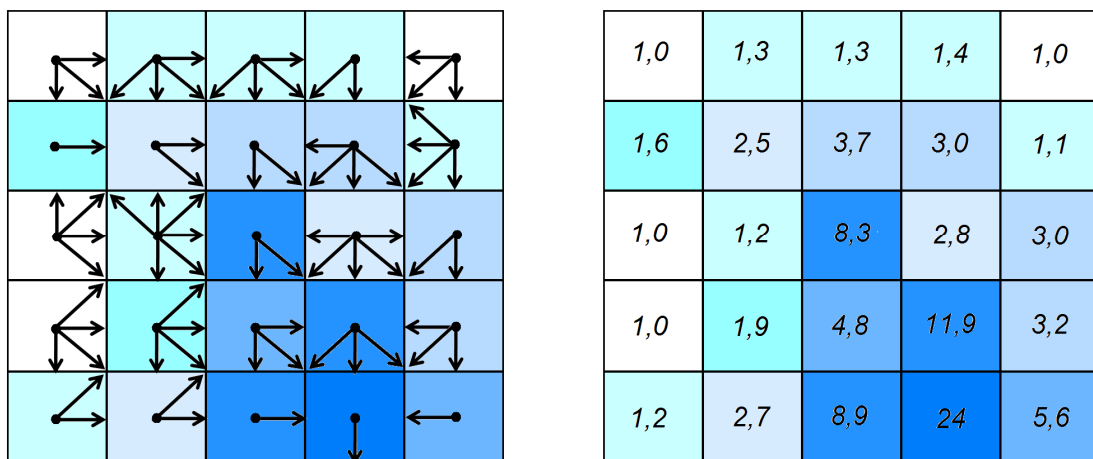


Figura 2.16 – Representação da distribuição de fluxo e área de captação calculados por meio do algoritmo *Multiple Flow Direction*

A área de captação também denominada área de contribuição ou fluxo acumulado, além de ser empregada para a modelagem do fator topográfico da USLE (MOORE; BURCH, 1986; DESMET; GOVERS, 1996a), é uma variável topográfica empregada na modelagem hidrológica para extração dos limites de bacias hidrográficas, da rede de drenagem e de outros índices topográficos relacionados aos processos do fluxo do escoamento superficial (MOORE; GRAYSON, 1991).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Fluxo de trabalho

Para alcançar o objetivo geral da presente pesquisa foi feito um desdobramento de cada etapa de modo a se individualizarem as atividades de trabalho. Desta forma, o encadeamento das atividades pode ser claramente percebido através do fluxo geral de trabalho esquematizado na Figura 3.1.

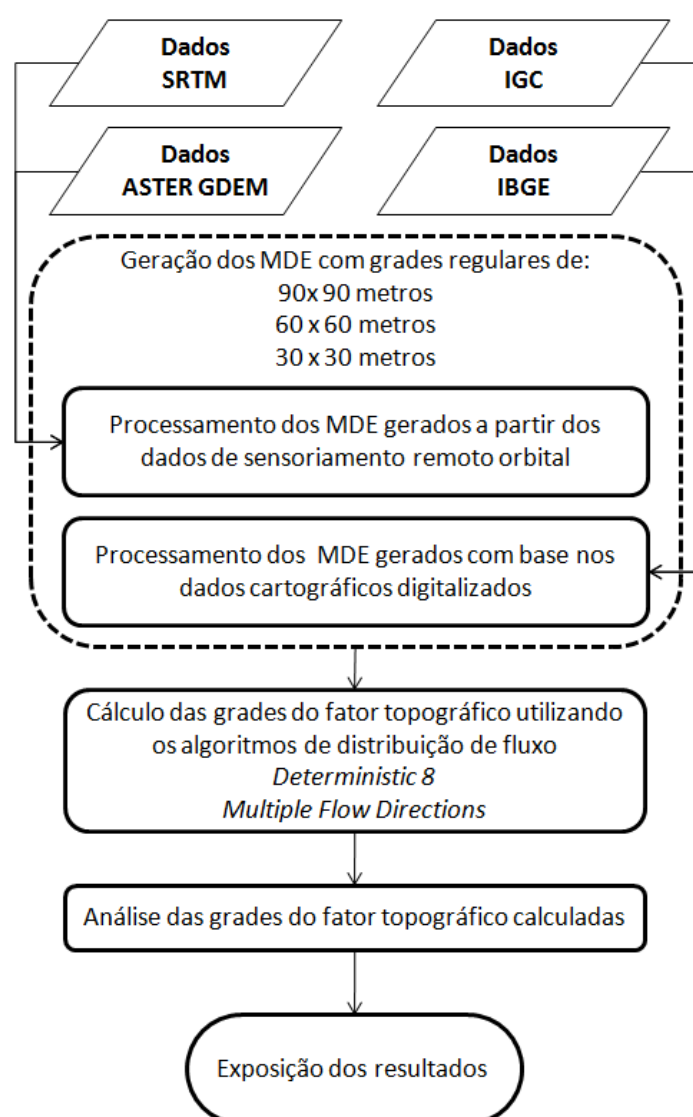


Figura 3.1 – Esquematização do fluxograma geral de atividades

3.2. Material

3.2.1. Área de estudo

Selecionou-se a bacia do rio Una, apresentada na Figura 3.2, por apresentar uma variedade topográfica adequada para os propósitos desta pesquisa.



Figura 3.2 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Una

Na seleção da área de estudo foi considerada a disponibilidade e a acessibilidade de dados cartográficos digitalizados, publicados nas escalas 1:10.000 e 1:50.000. Além disto, a bacia do rio Una constitui uma bacia hidrográfica típica da região do vale do rio Paraíba do Sul, que reflete as condições topográficas, geológicas e geomorfológicas das demais bacias da região. Ao mesmo tempo, nos últimos anos o rio Una tem provocado cheias e problemas de inundação devido ao assoreamento de sua calha em áreas rurais e urbanas, além de processos erosivos causados pelo rápido escoamento superficial, o que configura um cenário de aumento significativo de situações de risco (TARGA, 2009).

A bacia do rio Una, com área total de 476 km², é um dos mais importantes tributários do rio Paraíba do Sul no estado de São Paulo. Está situada na margem direita do rio Paraíba do Sul e localizada nos municípios de Pindamonhangaba (8%), Redenção da Serra (1%), Taubaté (84%) e Tremembé (7%). É formada pela união dos seguintes cursos d'água: (a) ribeirão das Almas; (b) rio da Rocinha e seus afluentes (córrego do Itaim, ribeirão das Pedras ou Ipiranga, ribeirão das Sete Voltas, rio das Antas, ribeirão do Registro, e demais tributários da bacia). É limitada pela Serra do Quebra Cangalha a nordeste e pela Serra do Jambeiro a sudeste. Do exutório no rio Paraíba do Sul, o rio Una estende-se por uma extensão de aproximadamente 36 km até a junção dos dois rios que o formam. Se adicionado o trecho correspondente ao seu formador mais longo, o rio Una apresenta uma extensão total de aproximadamente 68 km (TARGA, 2009).

Possui terrenos que se caracterizam por superfícies aplainadas com interflúvios sem orientação, morros de serras restritas e de topos arredondados. As vertentes em geral possuem perfis convexos e ou retilíneos, cujas declividades variam de 20 a 60% e as altitudes oscilam entre 500 e 1.000 metros (BATISTA et al., 2006; TARGA, 2009).

Os solos encontrados predominantemente são os Latossolos e Argissolos vermelho-amarelos. Entretanto, fazem-se presentes também os Gleissolos melânicos, sobretudo na área de várzea do rio Una com o rio Paraíba do Sul (OLIVEIRA, 1999). O clima da região é do tipo temperado úmido, com inverno seco e verão quente (Cwa), segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 21,4°C (SETZER, 1966; SENTELHAS et al., 1999).

3.2.2. Dados orbitais

Os dados SRTM com resolução de 3 arcos-segundo ($\pm 90\text{m}$) fornecidos gratuitamente pelo *United States Geological Survey* (USGS) no endereço <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/>, estão organizados em grades de 1° por 1° e identificados pelas informações de latitude e longitude do canto inferior esquerdo da grade. Para cobrir toda a área de estudo, são necessários os dados: S23W046 e S24W046, conforme a Figura 3.3.

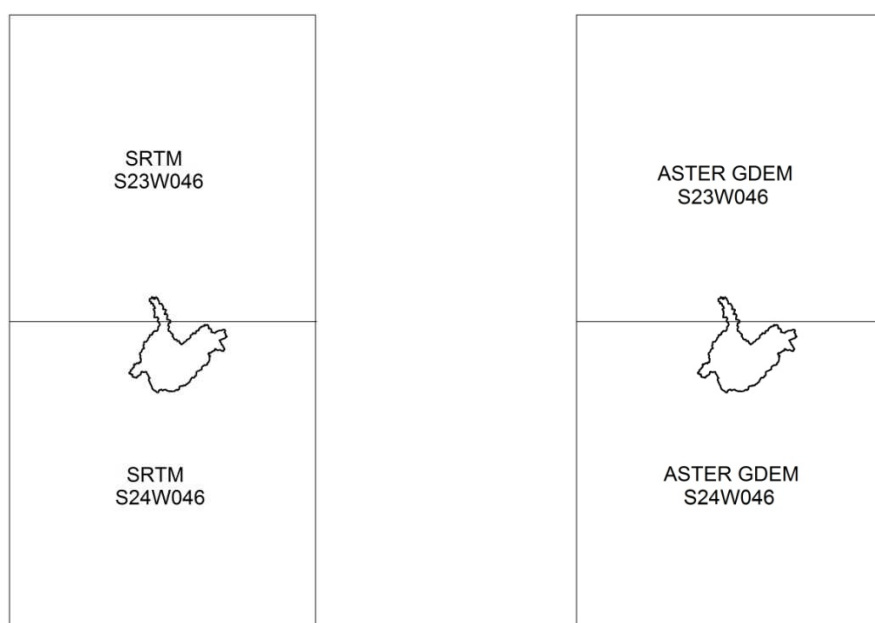


Figura 3.3 – Representação das grades SRTM (esquerda) e ASTER GDEM (direita) utilizadas para a geração dos MDE da bacia do rio Una

Os dados GDEM com resolução de 1 arco-segundo ($\pm 30\text{m}$) fornecidos gratuitamente pelo *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC), disponíveis no endereço <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>, também estão organizados em grades de 1° por 1° e identificados pela latitude e longitude do canto inferior esquerdo da imagem. Para cobrir completamente a área de estudo, são necessárias as seguintes grades: ASTGTM_S23W046 e ASTGTM_S24W046.

3.2.3. Dados cartográficos

Os dados cartográficos utilizados foram adquiridos no formato digital a partir dos bancos de dados dos projetos: Una (BATISTA et al., 2006) e Recarga (DIAS et al., 2009) do Laboratório de Geoprocessamento (LAGEO) da Universidade de Taubaté (UNITAU), com os dados altimétricos (isolinhas e pontos cotados) já vetorizados, facilitando o processo de geração dos MDE. Foram utilizadas 37 cartas do IGC com escala 1:10.000 e equidistância vertical de 5m entre as isolinhas e 4 cartas do IBGE com escala de 1:50.000 e equidistância vertical de 20m. É importante ressaltar que ainda não há disponibilidade de mapas com escalas 1:10.000 e 1:50.000 para toda a extensão do território nacional, principalmente prontamente digitalizados e vetorizados.

As 37 cartas do IGC utilizadas para a geração dos MDE da bacia do rio Una possuem escala 1:10.000 e são parte do projeto de levantamento topográfico do Macro Eixo Paulista realizado em 1978, contendo a representação precisa dos elementos naturais e antrópicos em folhas numeradas a partir de um sistema de identificação X e Y. Cada folha é identificada por um código formado por seis algarismos, sendo que os três primeiros correspondem ao eixo Y, e os três últimos ao eixo X, de acordo com o Mapa Índice dos Projetos de Mapeamento 1:10.000 (IGC, 1998). As 37 cartas digitalizadas foram

adquiridas no formato vetorial e divididas em 4 mosaicos (NE, NO, SE e SO), conforme ilustrado na Figura 3.4.

As 4 cartas de base do IBGE utilizadas para a geração dos MDE da bacia do rio Una possuem escala 1:50.000 e congregam o conjunto de dados cartográficos que têm por finalidade a representação do espaço territorial brasileiro de forma sistemática, disponibilizado no endereço <<ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/topograficos>>. Para cobrir a área de estudo, são necessárias as seguintes cartas: folha SF-23-Y-D-II-2 Taubaté, folha SF-23-Y-D-III-1 São Luiz do Paraitinga, folha SF-23-Y-B-V-4 Tremembé e folha SF-23-Y-B-VI-3 Pindamonhangaba, conforme ilustrado na Figura 3.4.

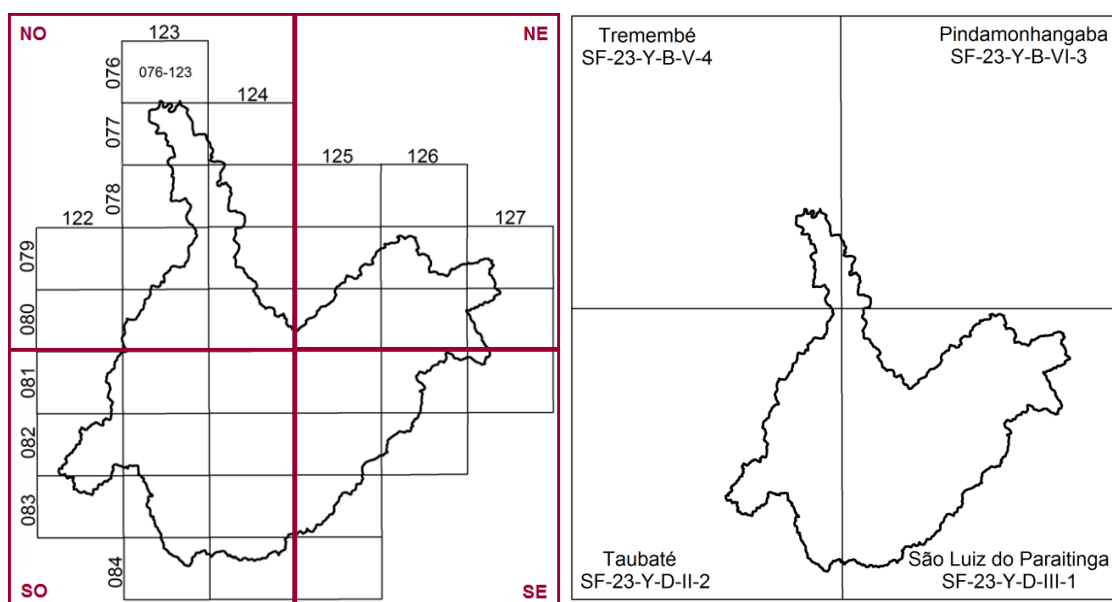


Figura 3.4 – Representação das 37 cartas do IGC separadas em 4 mosaicos (esquerda) e das 4 cartas IBGE (direita) utilizadas para a geração dos MDE da bacia do rio Una

A representação das formas do relevo por meio das isolinhas dos mapas planialtimétricos é condicionada à escala de representação da informação cartográfica. Assim, uma mesma feição topográfica representada em diferentes escalas pode apresentar características distintas, conforme a representação do

Morro Grande, na Figura 3.5, localizado no interior da bacia do rio Una. Deste modo, a qualidade do MDE gerado a partir dos dados cartográficos depende da escala do mapa utilizado.

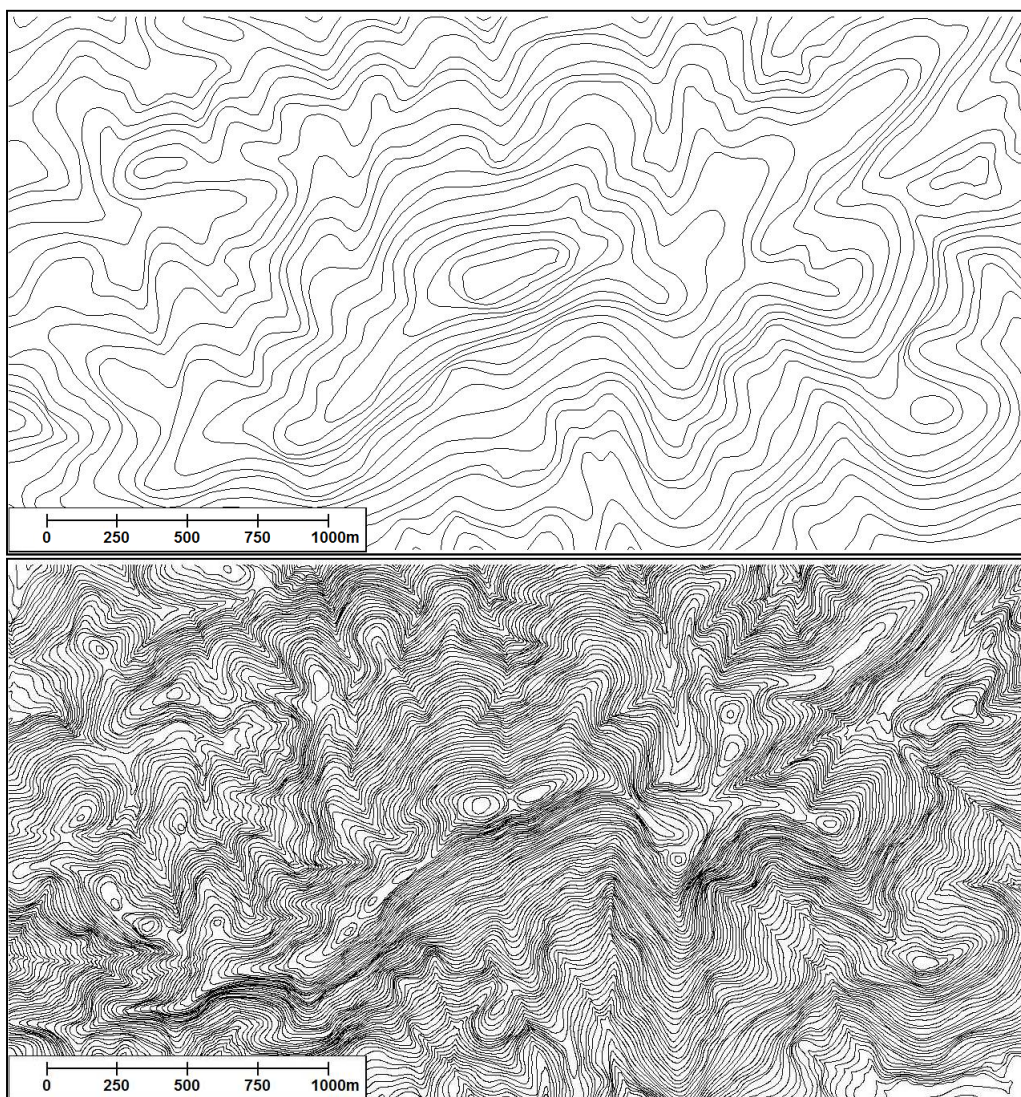


Figura 3.5 – Representação cartográfica do Morro Grande por meio das isolinhas do mapa IBGE folha SF-23-Y-D-III-1 com escala de 1:50.000 (acima) e do mapa IGC folha 081-125 com escala de 1:10.000 (abaixo)

3.2.4. Especificações dos aplicativos utilizados

O aplicativo *Global Mapper* (GLOBAL MAPPER SOFTWARE, 2008) foi utilizado para a conversão de formatos de arquivos hgt, tif, grd, dat, shp, txt,

entre outros, para geração de mosaicos, visualização das grades em perspectiva 3D e geração de figuras. O aplicativo *Idrisi Andes* (EASTMAN, 2006) foi utilizado para a manipulação dos dados altimétricos, análise estatística e análise de regressão dos resultados. O aplicativo *Statistica* (STATSOFT, 2004) foi utilizado para a manipulação de dados tabulares, análise estatística e para a geração de figuras.

O aplicativo *Surface Mapping System - Surfer* (GOLDEN SOFTWARE INC, 2009) foi utilizado para a geração de figuras em perspectiva 3D, análise geoestatística dos dados altimétricos, remoção da tendência dos dados, modelagem do semivariograma e interpolação dos dados ASTER GDEM e SRTM visando à geração dos MDE derivados dos dados orbitais. O aplicativo *ArcGis* (ESRI, 2008) foi empregado para a geração de figuras, manipulação e interpolação dos dados altimétricos visando a geração dos MDE derivados dos dados cartográficos.

O aplicativo *System for Automated Geoscientific Analyses – SAGA* (BÖHNER; CONRAD, 2009) foi empregado para a manipulação dos dados altimétricos, para o pré-processamento das grades dos MDE, cálculo das variáveis topográficas, modelagem da distribuição do fluxo, cálculo da área de captação e cálculo do fator topográfico.

3.3. Métodos

Conforme esquematizado no fluxograma geral de atividades ilustrado na Figura 3.1, a presente pesquisa pode ser dividida em etapas de modo a se individualizarem as atividades de trabalho. Desta forma os métodos empregados para o tratamento dos dados altimétricos, geração dos MDE, cálculo das variáveis topográficas, cálculo do fator topográfico e análise dos resultados são descritos nas seções seguintes.

3.3.1. Geração das grades dos Modelos Digitais de Elevação

O encadeamento dos processos realizados para a geração dos MDE a partir dos dados SRTM e GDEM pode ser ilustrado por meio do fluxograma apresentado na Figura 3.6.

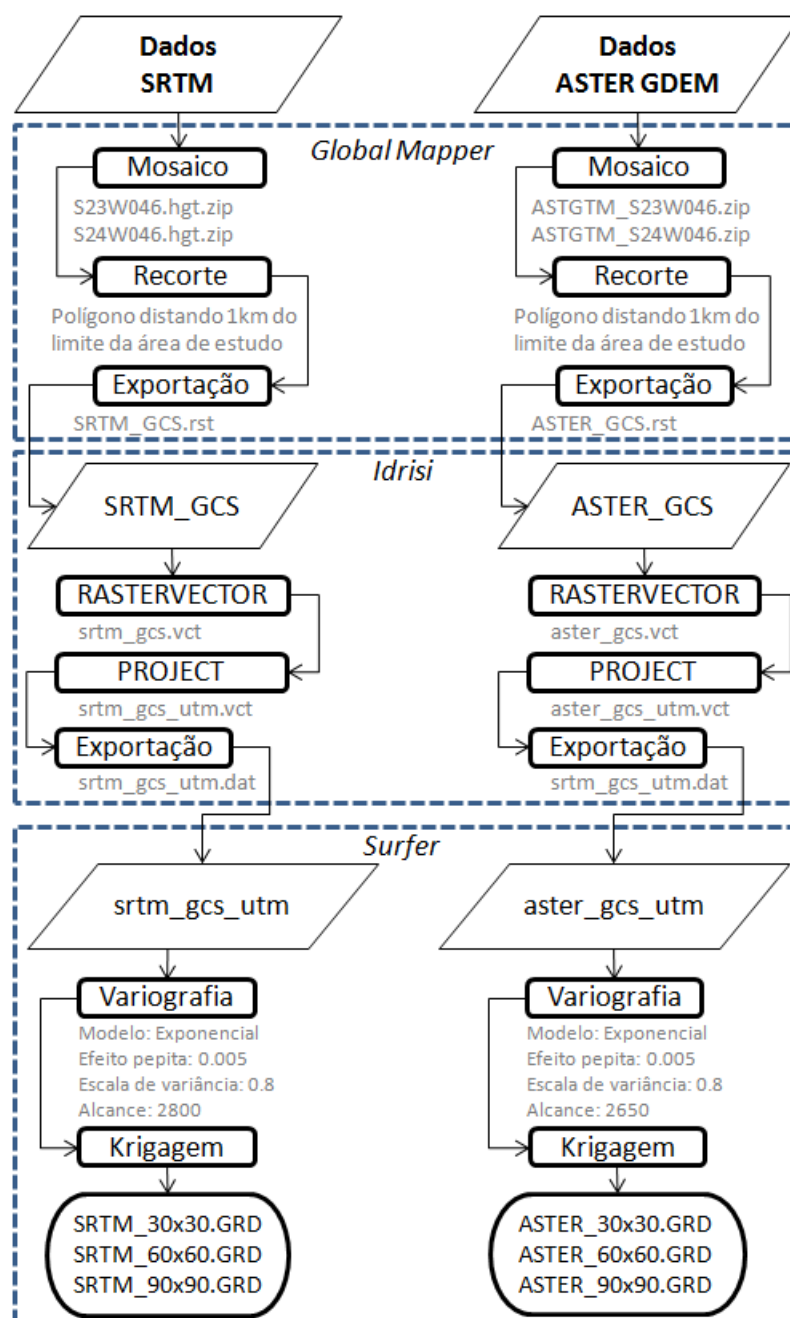


Figura 3.6 – Geração dos MDE com base nos dados de sensoriamento remoto orbital

Os dados originais SRTM (S23W046.hgt e S24W046.hgt) e GDEM (ASTGTM_S23W046.tif e ASTGTM_S23W046.tif) foram importados para o aplicativo *Global Mapper*, visando realizar o mosaico das grades necessárias para cobrir toda a extensão da bacia do Una. Em seguida, foi utilizado um polígono com lados distando 1 km do limite da bacia para recortar os mosaicos gerados. Após o recorte dos dados referentes à área de estudo, as grades foram exportadas no formato de arquivo do aplicativo *Idrisi* (SRTM_GCS.rst e ASTER_GCS.rst).

As grades exportadas pelo *Global Mapper* foram importadas pelo *Idrisi* e convertidas para o formato vetorial de dados altimétricos utilizando a ferramenta do módulo *RASTERTOVECTOR*, de modo que os valores de altitude passaram a ser representados por pontos regularmente espaçados no espaço vetorial (srtm_gcs.vct e aster_gcs.vct). Foi utilizado o módulo *PROJECT* para converter os dados vetoriais projetados no sistema de coordenadas geográficas para o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), utilizando o sistema de referência *br_utm23sad_s* correspondente ao datum *South America Datum 1969* (SAD69) e à zona 23 sul.

Deste modo, os dados altimétricos vetoriais gerados a partir das grades SRTM e GDEM foram convertidos para o sistema de projeção UTM (srtm_gcs_utm.vct e aster_gcs_utm.vct) sem a necessidade de interpolação dos valores da grade e a consequente alteração da distribuição dos valores de altitude originais. Em sequência, os dados vetoriais projetados foram exportados como arquivos Ascii xyz contendo a localização geográfica em unidades métricas e o valor de altitude associado a cada ponto (srtm_gcs_utm.xyz e aster_gcs_utm.xyz). A conversão dos arquivos xyz para o formato de arquivo dat foi realizada alterando a extensão dos arquivos manualmente (srtm_gcs_utm.dat e aster_gcs_utm.dat).

Os arquivos dat foram importados pelo aplicativo *Surfer* no qual foi realizada a análise estatística descritiva dos dados, a remoção da tendência dos dados, análise geoestatística envolvendo a modelagem dos semivariogramas padronizados, a seleção dos coeficientes geoestatísticos e a interpolação utilizando a Krigagem.

Na análise estatística descritiva buscou-se avaliar as possíveis alterações devido à conversão do sistema de projeção dos dados, além das características das distribuições de valores. Para isto, foram analisados os histogramas das distribuições de valores de altitude dos arquivos vetoriais convertidos para UTM (*srtm_gcs_utm.dat* e *aster_gcs_utm.dat*) e comparado com histogramas dos arquivos vetoriais de pontos gerados a partir das grades SRTM e GDEM com a projeção original dos dados (*srtm_gcs.dat* e *aster_gcs.dat*).

A remoção da tendência dos dados foi realizada utilizando um polinômio de primeira ordem visando à análise geoestatística com base nos resíduos dos dados altimétricos. Os modelos de semivariograma utilizados para a Krigagem são expostos na Figura 3.7.

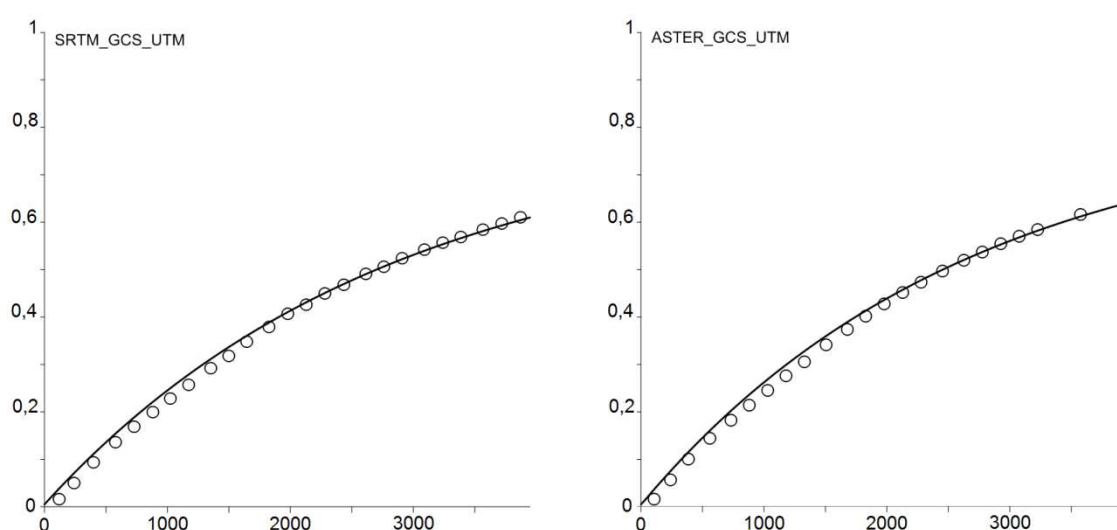


Figura 3.7 – Modelos de semivariograma exponencial utilizados na Krigagem

Os semivariogramas omnidirecionais ajustados aos resíduos dos dados SRTM e GDEM são do modelo exponencial e foram gerados com base em arquivos contendo 79.348 e 714.081 pontos, respectivamente. O efeito pepita de 0,005 e a escala de 0,8 foram adequados para ambos os semivariogramas, enquanto que o alcance adequado aos dados SRTM foi de 2800m e aos dados GDEM foi de 2650m. Estes coeficientes geoestatísticos foram empregados para a interpolação dos arquivos vetoriais correspondentes aos dados SRTM e GDEM na projeção UTM de modo a gerar os MDE com diferentes espaçamentos de grade, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características das grades dos MDE gerados utilizando a Krigagem

Espaçamento	30m x 30m	60m x 60m	90m x 90m
X mínimo	430.015	430.030	430.045
X máximo	474.985	474.970	474.955
Y mínimo	7.425.015	7.425.030	7.425.045
Y máximo	7.469.985	7.469.970	7.469.955
n°colunas	1.500	750	500
n° linhas	1.500	750	500

A esquematização dos processos realizados para a geração dos MDE com base nos dados cartográficos vetorizados a partir dos mapas do IBGE e do IGC está ilustrada no fluxograma apresentado na Figura 3.8. Os arquivos vetoriais no formato shp contendo as isolinhas e os pontos cotados digitalizados a partir dos mapas do IBGE e IGC foram importados pelo aplicativo *ArcMap* do pacote *ArcGis*.

Em seguida, foram realizados os mosaicos dos dados de modo a cobrir toda a extensão da bacia do Una. Em seguida, foi utilizado o polígono com lados distando 1 km do limite da bacia para recortar os mosaicos gerados. Após o

recorte dos dados referentes à área de estudo, foi realizada a interpolação dos dados vetoriais utilizando a ferramenta *Topo to Raster* baseada no método proposto por Hutchinson (1989) e disponível no módulo *3D Analyst* do *ArcMap*, de modo a gerar os MDE com diferentes espaçamentos de grade. Os parâmetros selecionados para a interpolação foram correção hidrológica do tipo *ENFORCE* e como principal tipo de dado de entrada foi utilizado a opção *CONTOUR* (isolinhas). As grades dos MDE geradas após a interpolação dos dados cartográficos vetorizados foram exportadas no formato de arquivo tif.

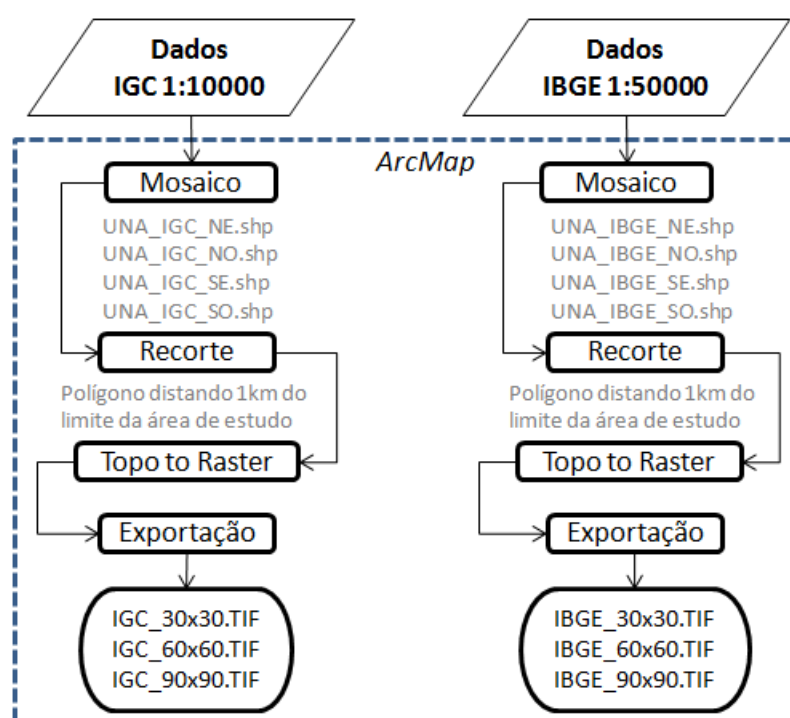


Figura 3.8 – Geração dos MDE com base nos dados cartográficos vetorizados

No *ArcMap* os valores de X mínimo, X máximo, Y mínimo e Y máximo correspondem ao centro das células que delimitam a grade do MDE, enquanto que no *Surfer* os valores correspondem às extremidades das células que delimitam a grade do MDE. Por isto, para gerar as grades dos MDE interpoladas no *ArcMap* com características idênticas às grades interpoladas no *Surfer*, foram adotados os valores de X mínimo, X máximo, Y mínimo e Y máximo apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características das grades dos MDE gerados utilizando a ferramenta *topo to raster*

Espaçamento	30m x 30m	60m x 60m	90m x 90m
X mínimo	430.000	430.000	430.000
X máximo	475.000	475.000	475.000
Y mínimo	7.425.000	7.425.000	7.425.000
Y máximo	7.470.000	7.470.000	7.470.000
nº colunas	1.500	750	500
nº linhas	1.500	750	500

3.3.2. Cálculo das grades do fator topográfico

Após a geração dos MDE, o aplicativo *SAGA* foi utilizado para importar as grades originadas. As variáveis topográficas declividade ' θ ' e aspecto ' ϕ ' foram calculadas com base nos MDE importados, utilizando o método proposto por Zevenbergen e Thorne (1987) disponível no módulo *Terrain Analysis - Morphometry*.

Em seguida o módulo *Preprocessing* foi realizado para adequar os MDE à modelagem hidrológica, visando o cálculo da área de captação. O módulo *Hydrology* foi empregado para a modelagem da distribuição do fluxo e cálculo da variável topográfica área de captação ' A ' utilizando os algoritmos *Deterministic 8* e *Multiple Flow Directions* aplicados aos MDE pré-processados.

Utilizou-se o módulo *Grid Calculator* para calcular o fator topográfico com base nas variáveis topográficas extraídas a partir dos MDE. Os processos envolvidos no cálculo das grades do fator topográfico a partir dos MDE gerados podem ser esquematizados conforme apresentado no fluxograma ilustrado na Figura 3.9. Deste modo, cada MDE gerado foi utilizado como base para o cálculo do fator

topográfico empregando os diferentes algoritmos de distribuição do fluxo em cada MDE.

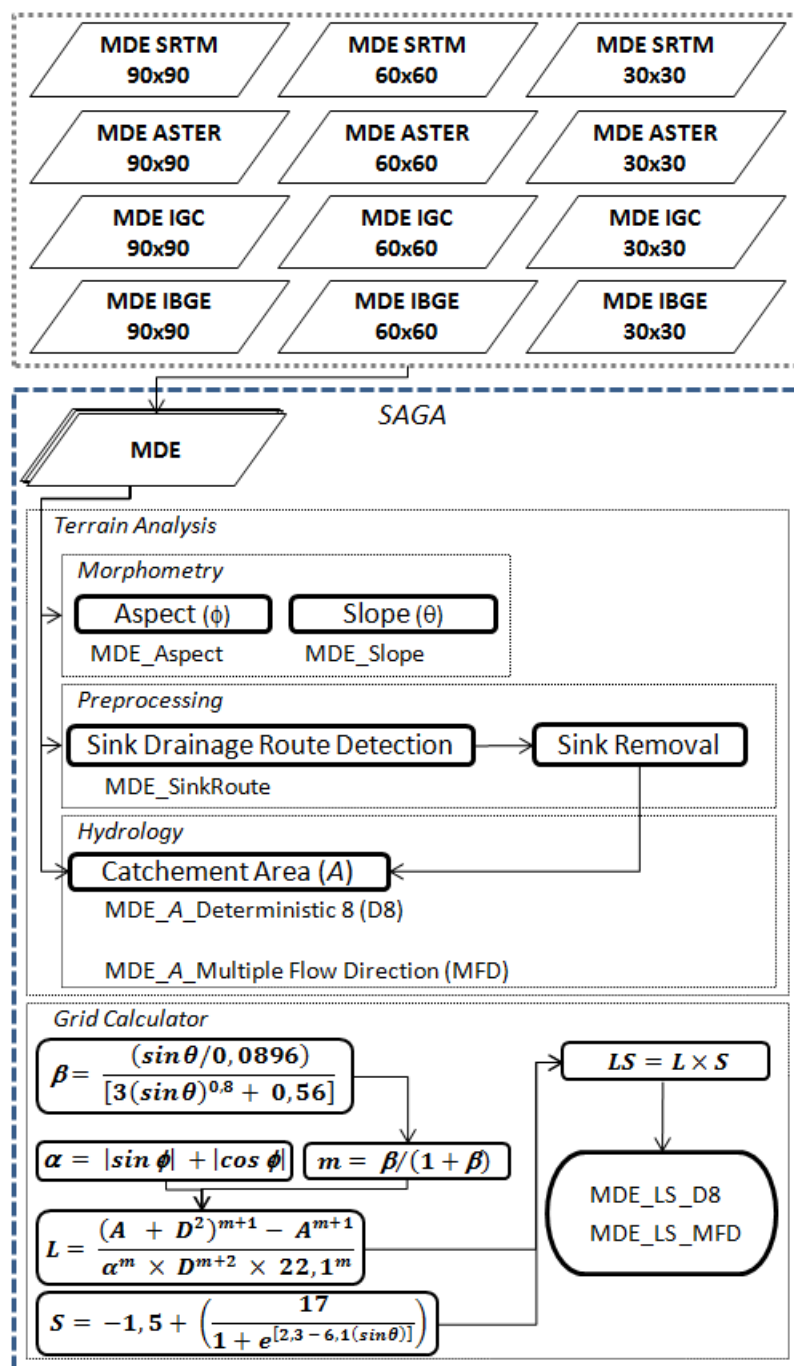


Figura 3.9 – Cálculo das variáveis topográficas e do fator topográfico

As equações Equação 2.6, Equação 2.7, Equação 2.10, Equação 2.15 e Equação 2.16, apresentadas anteriormente, foram utilizadas para calcular o fator topográfico e seus componentes. Deste modo, as equações empregadas foram reescritas de forma adequada ao módulo *Grid Calculator* por meio das seguintes formulas:

Tabela 3.3 – Fórmulas utilizadas para o cálculo do fator topográfico no módulo *Grid Calculator* do aplicativo SAGA

<i>L</i>	$\frac{((a+(30^2))^{(b+1)})-(a^{(b+1)})}{((((abs(\sin(c)))+(abs(\cos(c))))^b*(30^{(b+2)})*(22.1^b))}$
<i>m</i>	$\frac{(((\sin(d))/0.0896)/(3*((\sin(d))^{0.8}+0.56)))/(1+(((\sin(d))/0.0896)/(3*((\sin(d))^{0.8}+0.56))))}$
<i>S</i>	$-1.5+(17/(1+((2.71828182845904)^{(2.3-(6.1*(\sin(d)))))))$
<i>LS</i>	$l*s$

Onde 'a' corresponde às grades dos valores de área de captação 'A' calculadas utilizando os algoritmos *D8* e *MFD*, 'b' às grades dos valores do expoente 'm', 'c' às grades dos ângulos de aspecto 'φ', 'd' corresponde às grades de declividade 'θ', 'l' equivale ao fator 'L' e 's' ao fator 'S' calculados.

Após os processos de geração dos MDE e cálculo do fator topográfico, foram gerados 12 MDE devido ao fato de utilizar 4 diferentes fontes de dados altimétricos (SRTM, GDEM, IBGE e IGC) e 3 diferentes espaçamentos de grade (30m x 30m, 60m x 60m e 90m x 90m). Para cada um dos doze MDE gerado foram calculados: fator 'L' utilizando o algoritmo *D8*, fator 'L' utilizando o algoritmo *MFD*, fator 'S', fator 'LS' resultante da multiplicação do fator 'L' *D8* e o fator 'S' calculado e fator 'LS' resultante da multiplicação do fator 'L' *MFD* e o fator 'S'.

3.3.3. Análise das grades do fator topográfico

Para estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos a partir dos diferentes MDE, depois de calculados os valores das grades que compõem o fator topográfico 'LS' de cada MDE, foram realizadas as seguintes análises:

- a) Análise visual
- b) Análise estatística descritiva
- c) Análise de regressão
- d) Análise dos resíduos

Os resultados obtidos com base nos MDE derivados dos dados de SR orbital SRTM e GDEM foram comparados com os resultados obtidos a partir dos MDE derivados dos dados cartográficos do IBGE e IGC. Os MDE gerados com base nos dados cartográficos dos mapas do IGC foram adotados como referência para avaliar a precisão oferecida pelos demais MDE utilizados.

3.3.3.1. Análise visual

A análise visual dos resultados buscou comparar os MDE gerados quanto aos diferentes potenciais para identificar as áreas com maior potencial erosivo em função do escoamento superficial. Foi avaliada a distribuição espacial do fator topográfico e seus componentes, calculados a partir dos diferentes MDE. A distribuição espacial dos erros foi verificada por meio da relação entre os resultados calculados com base nos MDE e os resultados obtidos com base nos MDE de referência (derivado a partir dos dados cartográficos do IGC).

Foram utilizadas diferentes paletas de cores para a representação da variação da altitude, do fator 'L', fator 'S', fator topográfico 'LS', resíduo absoluto e resíduo padronizado. Os resultados foram analisados utilizando diferentes

modos de visualização. Dentre estes, utilizou-se a visualização em perspectiva 3D das formas de relevo sobrepostas com a representação da distribuição espacial dos resultados, de modo a visualizar a relação das formas de relevo com a variação do fator topográfico.

3.3.3.2. Análise estatística descritiva

A análise estatística descritiva dos resultados foi realizada visando analisar as diferenças entre as distribuições dos valores resultantes. Foram analisadas as medidas de tendência central e de dispersão das grades resultantes. As distribuições de valores foram representadas utilizando gráficos de caixas com base no Intervalo Interquartil (IIQ) conforme representado na Figura 3.10.

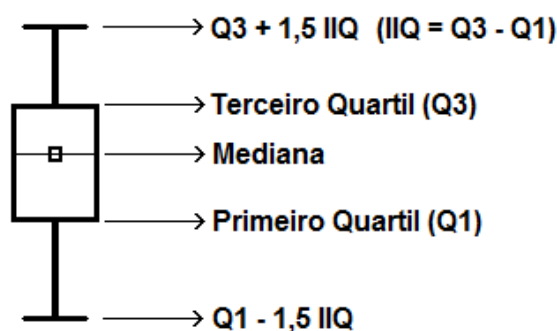


Figura 3.10 – Gráfico de caixas utilizado para a análise das distribuições de valores

3.3.3.3. Análise de regressão

A análise quantitativa da relação entre os resultados gerados com base nos diferentes MDE foi realizada por meio da análise de correlação entre os resultados dos MDE derivados de dados de SR e dados cartográficos. Foi adotado um sistema de amostragem aleatória utilizando aproximadamente 10.000 pontos distribuídos por toda a extensão da bacia do Una, conforme ilustrado na Figura 3.11, de modo a evitar a influência da autocorrelação espacial nas análises de regressão dos resultados.

A amostragem dos pontos foi realizada por meio da ferramenta *SAMPLE*, disponível no aplicativo *Idrisi*. Os pontos gerados foram convertidos para o formato matricial, gerando grades de 30m x 30m, 60m x 60m e 90m x 90m contendo valores de 0 ou 1, utilizadas como máscara para a análise de regressão. Deste modo, a análise de regressão foi realizada considerando apenas os valores correspondentes às células identificadas com o valor 1 na grade de máscara.

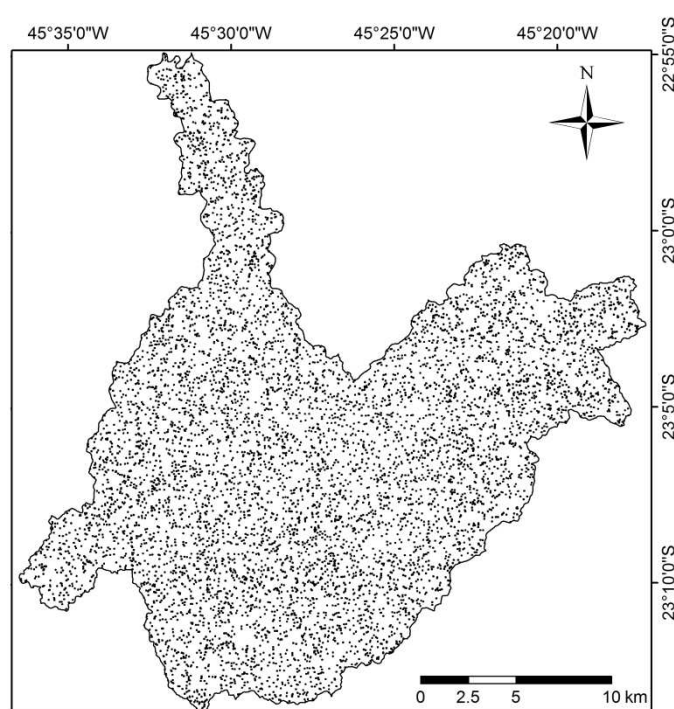


Figura 3.11 – Distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados para a análise de regressão dos resultados

3.3.3.4. Análise dos resíduos

Os resultados obtidos foram analisados de modo a verificar a distribuição dos erros inerentes aos cálculos baseados nos MDE derivados dos dados de SR em relação ao MDE de referência derivado a partir dos dados cartográficos dos mapas do IGC. Utilizou-se a Equação 3.1 para calcular o resíduo absoluto e a Equação 3.2 para o cálculo do resíduo padronizado.

$$\textit{Resíduo absoluto} = \textit{Observado} - \textit{Esperado} \quad (3.1)$$

$$\textit{Resíduo padronizado} = (\textit{Observado} - \textit{Esperado})/\textit{Esperado} \quad (3.2)$$

Deste modo, o valor observado corresponde aos resultados obtidos com base nos MDE derivados dos dados SRTM, GDEM e IBGE, enquanto que o valor esperado equivale aos resultados obtidos a partir dos MDE gerados com base nos mapas do IGC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão apresentados conforme a sequência dos objetivos específicos apresentados anteriormente. Desta forma, primeiramente são apresentados os MDE gerados a partir das diferentes fontes de dados altimétricos, evidenciando as principais características de cada MDE. Em seguida as grades componentes do fator topográfico resultantes de cada MDE são comparadas de modo a ressaltar as diferenças entre os resultados obtidos a partir dos diferentes MDE e avaliar os potenciais e limitações dos algoritmos de distribuição de fluxo utilizados para a modelagem do fator topográfico. A influência do espaçamento da grade do MDE na modelagem do fator topográfico também é discutida. Os resultados obtidos por meio da análise estatística descritiva, análise de regressão e análise dos resíduos são comparados de modo a expor as principais diferenças entre os MDE e métodos utilizados para o cálculo do fator topográfico da USLE.

Os gráficos e tabelas contendo as distribuições de valores, medidas de tendência e de dispersão dos resultados observados nas grades do fator 'L', fator 'S' e fator 'LS' estão reunidos no Apêndice A. Os resultados obtidos a partir da análise de regressão das grades do fator 'L', fator 'S' e fator 'LS', calculados a partir dos diferentes MDE, estão apresentados no Apêndice B. Os gráficos que ilustram as distribuições de valores dos resíduos padronizados, calculados com base nos resultados obtidos pelos MDE gerados a partir dos dados SRTM, GDEM e IBGE em comparação com os resultados obtidos com base nos MDE derivados dos dados IGC, estão agrupados no Apêndice C.

4.1. Potenciais e limitações dos MDE utilizados

Os MDE gerados apresentaram diferentes características de acordo com os dados altimétricos utilizados. Os MDE gerados a partir dos dados altimétricos obtidos por SR orbital (SRTM e GDEM) e os MDE gerados a partir dos dados cartográficos (IBGE e IGC) representam as formas de relevo da bacia do rio

Uma de maneira semelhante. Porém, a análise dos MDE utilizando a visualização da superfície sombreada em diferentes níveis de aproximação, com base nas feições do relevo de regiões com características topográficas diferentes, possibilitou identificar as principais diferenças entre os MDE gerados a partir dos dados altimétricos utilizados.

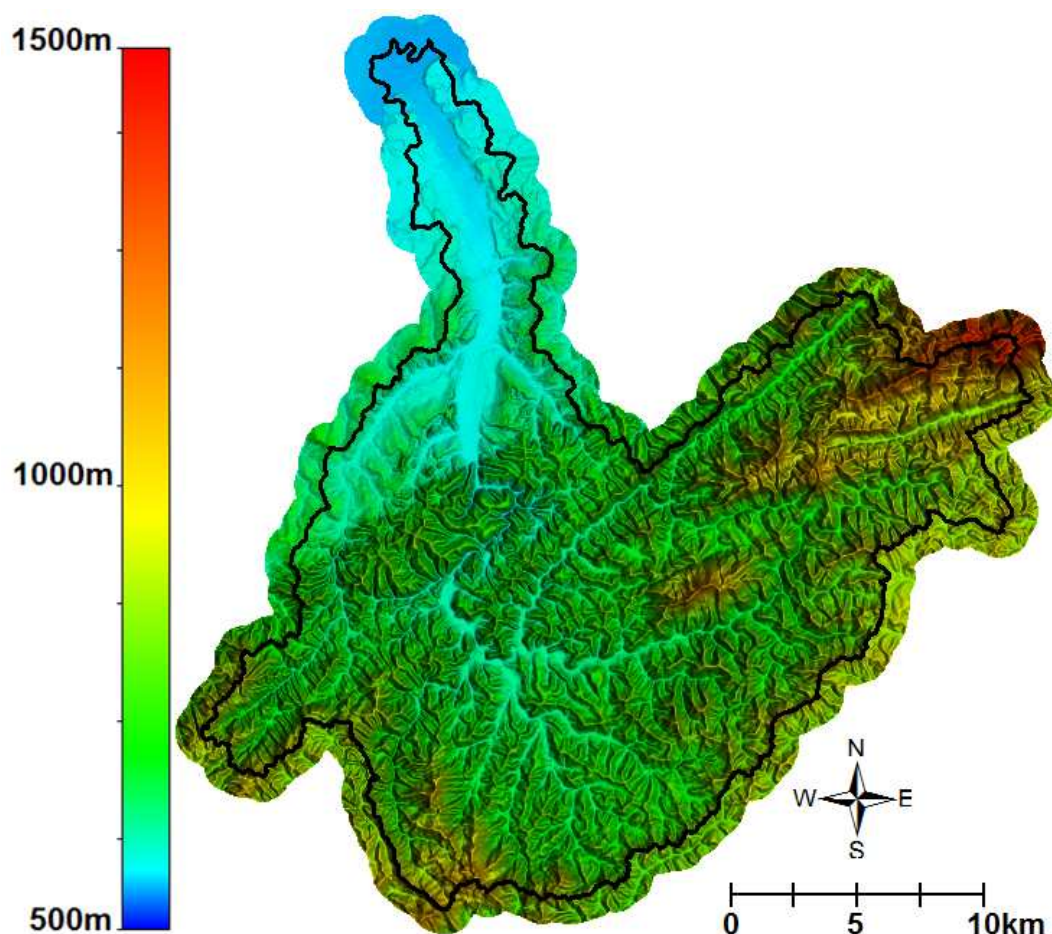


Figura 4.1 – Representação do relevo sombreado da bacia do Una utilizando o MDE 30m x 30m gerado a partir dos dados altimétricos dos mapas do IGC

As formas de relevo da bacia do rio Una estão representadas na Figura 4.1, permitindo visualizar as principais características topográficas da bacia. As áreas planas e o exutório (ponto onde se concentra todo o escoamento superficial gerado no interior de uma bacia hidrográfica) estão localizadas ao norte. As altitudes mais elevadas encontram-se na Serra do Quebra Cangalha

localizada na região nordeste, na Serra do Jambreiro na região sul e no Morro Grande situado na região centro-leste da bacia.

Observando os MDE gerados a partir dos diferentes dados altimétricos é possível identificar as características peculiares a cada MDE. Os dados altimétricos utilizados para a geração dos MDE apresentam diferentes potenciais para a representação de áreas planas e áreas com relevo acidentado, conforme ilustrado na Figura 4.2 e Figura 4.3, respectivamente.

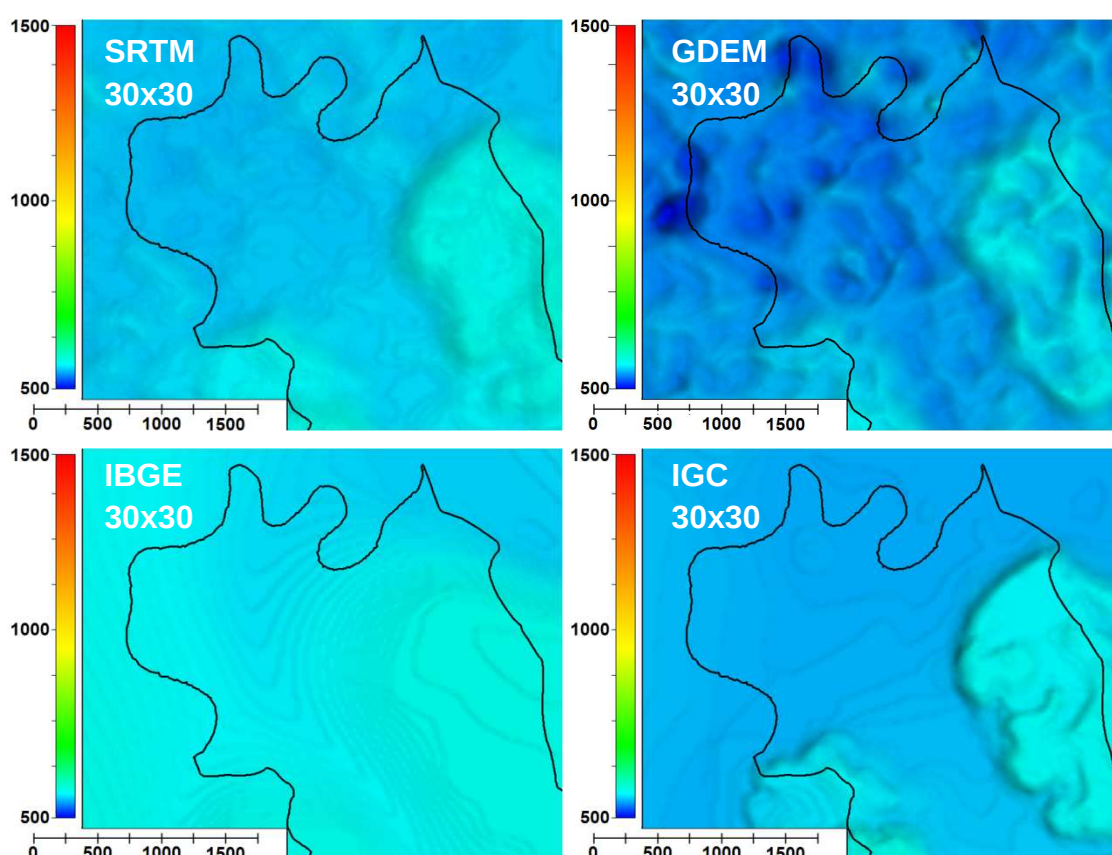


Figura 4.2 – Representação do exutório da bacia do rio Una utilizando relevo sombreado aplicado aos diferentes MDE avaliados

Os dados SRTM possibilitaram a geração de MDE capazes de representar as feições topográficas das áreas planas de forma adequada ao cálculo das variáveis topográficas utilizadas no cálculo do fator topográfico. Os dados GDEM apresentaram grande quantidade de artefatos nas áreas planas,

caracterizando a superfície rugosa dos MDE gerados com base nestes dados. Entretanto, nas áreas com relevo acidentado os artefatos são menos frequentes e menos perceptíveis nos MDE gerados com base nesses dados, permitindo a representação das feições topográficas do terreno.

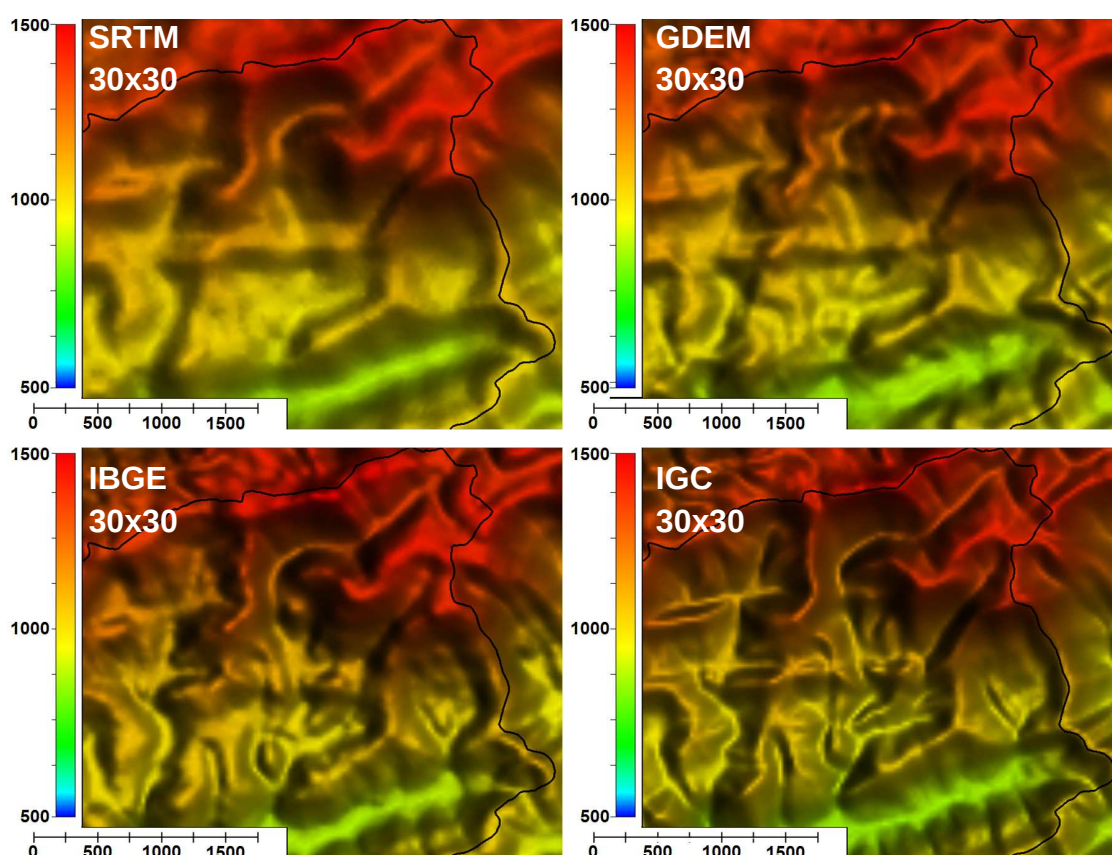


Figura 4.3 – Representação da Serra do Quebra Cangalha utilizando relevo sombreado aplicado aos diferentes MDE avaliados

Os dados cartográficos apresentam grandes espaços com ausência de dados altimétricos, caracterizando as áreas planas. Nestas áreas, o processo de interpolação determina os valores da grade do MDE gerado com base nestes dados. A escala de representação da informação cartográfica define o espaçamento entre as isolinhas utilizadas para a geração dos MDE e consequentemente influencia no potencial de representação das feições topográficas características do terreno.

Os dados cartográficos do IBGE com escala 1:50.000 possuem isolinhas altimétricas com equidistância vertical de 20m, ou seja, para que uma feição topográfica seja representada, ela necessita ter uma variação de altitude maior que 20m. Entretanto os dados cartográficos do IGC com escala de 1:10.000 e equidistância de 5m permitem representar variações de altitude com amplitude muito menor, favorecendo a modelagem das feições topográficas da superfície com maior precisão, conforme representado na Figura 4.4.

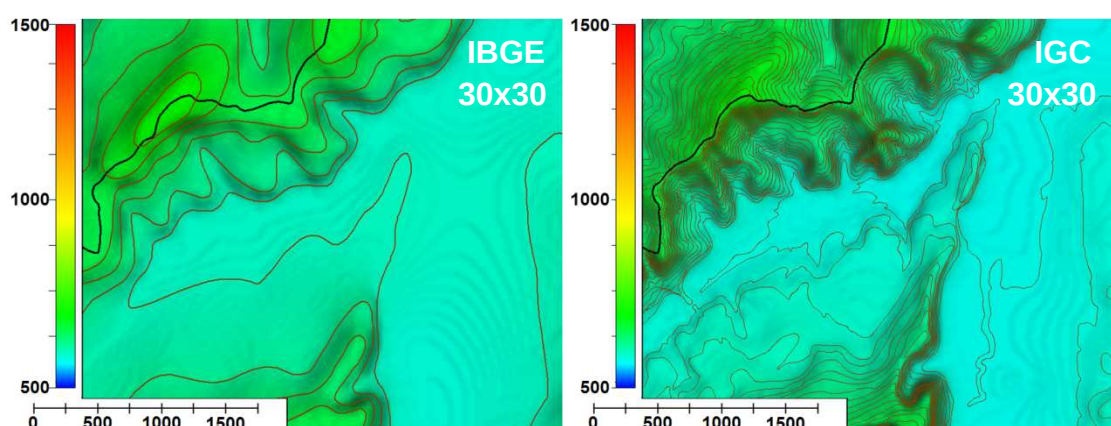


Figura 4.4 – Representação dos MDE gerados a partir da interpolação das isolinhas extraídas dos mapas do IBGE e IGC

Os dados obtidos por SR orbital utilizados para a geração dos MDE são estruturados em grades matriciais e por isto possuem dados altimétricos modelando a superfície do terreno mesmo nas áreas planas. Entretanto, as diferentes características dos dados SRTM e GDEM, como o tipo de processo de aquisição, pré-processamento, resolução e precisão dos dados altimétricos, conferem diferentes potenciais aos MDE gerados a partir destes dados.

Os dados SRTM apresentam menor resolução do que os dados GDEM, pois os dados altimétricos originais SRTM possuem resolução de 3 arcos-segundo, enquanto que os dados GDEM possuem resolução de 1 arco-segundo. Apesar do processo de interpolação possibilitar a geração de MDE com diferentes espaçamentos de grade e permitir a representação do potencial erosivo do

fator topográfico utilizando diferentes tamanhos de célula, a resolução dos dados altimétricos não pode ser aperfeiçoada. Isto confere aos MDE gerados com base nos dados SRTM menor potencial para a representação espacial da variabilidade altimétrica, contribuindo para a suavização das feições topográficas e influenciando no cálculo do fator topográfico.

Porém, nos dados SRTM, a presença de artefatos causados pela interferência do dossel da vegetação é menor do que os verificados nos dados GDEM, além disto, nos dados GDEM ocorrem artefatos causados pela presença de nuvens e outros alvos indesejáveis presentes nas imagens ASTER utilizadas para a geração dos dados altimétricos. Ainda, a presença de nuvens nas imagens orbitais obtidas por sensores ópticos nesta região é frequente, enquanto que a presença de dosséis arbóreos capazes de prejudicar a aquisição dos dados altimétricos é pouco frequente na bacia do rio Una. De acordo com o banco de dados ambientais da bacia do rio Una (BATISTA et al., 2006) apenas 30% da cobertura do solo da bacia corresponde à vegetação arbórea.

Os dados SRTM oferecem maior precisão do que os dados GDEM. Esta qualidade pode ser percebida devido à grande quantidade de artefatos contidos na estrutura dos dados altimétrico GDEM. Conforme os resultados apresentados por Rabus et al. (2003) e Rodríguez et al. (2006), os dados SRTM apresentam erro absoluto de localização de 9,0m, erro absoluto de altitude (calculado em relação ao conjunto total dos dados) de 6,2m e erro relativo de altitude (calculado em uma escala local de 200 km) de 5,5m, enquanto que os dados GDEM apresentam precisão global de 30m na horizontal (erro absoluto de localização) e de 20m na vertical (erro absoluto de altitude). Deste modo, os dados SRTM e GDEM apresentaram diferentes potenciais para a geração de MDE utilizados para a modelagem da erosão, possibilitando alternativas que favoreçam a precisão altimétrica ou a resolução de representação da informação topográfica.

De maneira geral, as feições do relevo são representadas de modo semelhante pelos MDE gerados a partir dos diferentes dados altimétricos. A Figura 4.5 ilustra as superfícies sombreadas em perspectiva 3D, modeladas a partir dos diferentes dados altimétricos utilizados para a geração dos MDE.

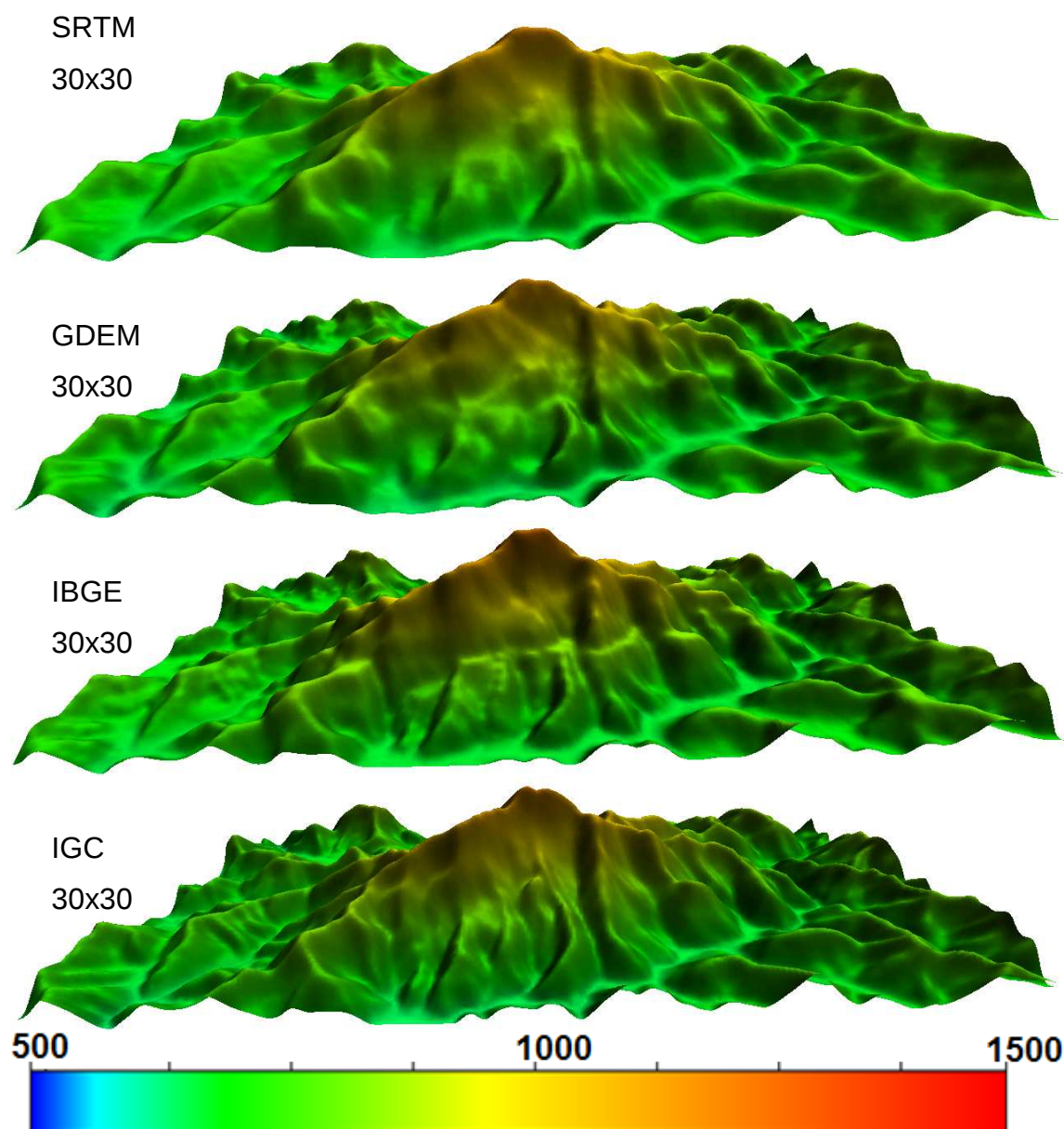


Figura 4.5 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D do Morro Grande por meio dos diferentes MDE avaliados

Comparando os MDE gerados a partir dos dados SRTM, GDEM, e IBGE com o MDE de maior precisão gerado a partir dos dados cartográficos do IGC é possível notar que os MDE derivados dos dados obtidos por SR orbital apresentam grande potencial para a representação da superfície do terreno e modelagem do fator topográfico. A análise de regressão com base nos valores de altitude modelados pelos diferentes MDE permitiu verificar a alta correlação dos MDE gerados com base nos dados de SR orbital SRTM e GDEM em relação aos MDE gerados a partir dos dados cartográficos do IGC. Os MDE gerados a partir dos dados cartográficos do IBGE apresentaram menor correlação com os MDE de referência, conforme apresentado na Figura 4.6.

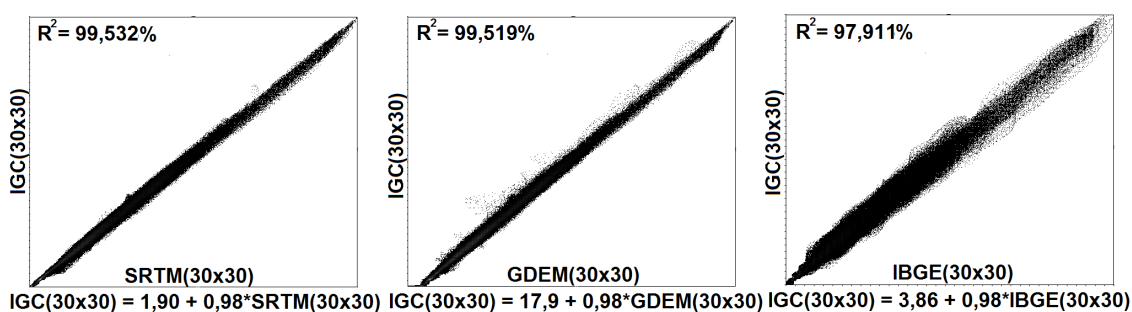


Figura 4.6 – Análise de regressão dos valores de altitude dos MDE gerados com base nos dados SRTM, GDEM e IBGE em relação ao MDE derivado dos dados IGC

Foi possível notar que o espaçamento da grade do MDE influencia na correlação entre os dados altimétricos contidos na superfície dos MDE. A utilização do espaçamento de grade de 30m x 30m tende a resultar em menores correlações entre os MDE quando comparado com espaçamentos de grade maiores. Porém a correlação entre a altitude dos MDE gerados a partir dos dados SRTM, GDEM e IBGE mantém a mesma relação apresentada na Figura 4.6. Deste modo, os dados obtidos por SR orbital, SRTM e GDEM, permitiram a geração de MDE com características altimétricas mais precisas do que os dados cartográficos de escala 1:50.000 do IBGE. Entretanto, apesar das semelhanças altimétricas apresentadas pelos diferentes MDE, as variáveis topográficas extraídas a partir destes apresentam resultados distintos e com

isto, o fator topográfico calculado também apresenta variações devido às características dos dados altimétricos utilizados e consequentes diferenças nas superfícies modeladas de cada MDE. A Figura 4.7 apresenta a análise de regressão com base nos valores de declividade, enquanto que a Figura 4.8 apresenta a análise de regressão com base nos valores de área de captação, calculados a partir dos diferentes MDE.

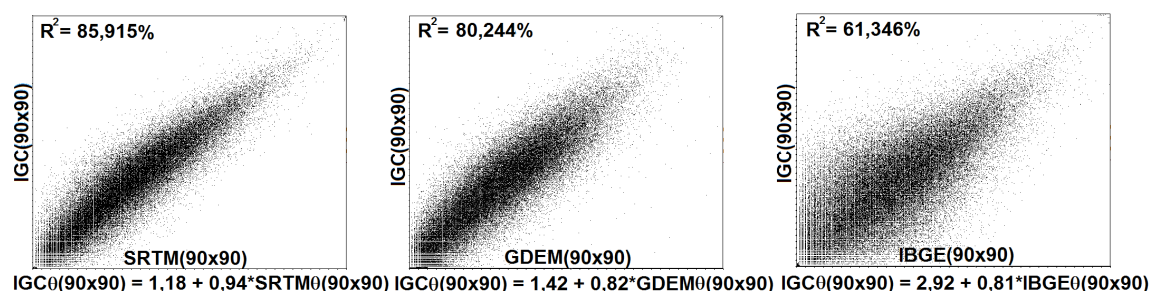


Figura 4.7 – Análise de regressão dos valores de declividade dos MDE gerados com base nos dados SRTM, GDEM e IBGE em relação aos derivados dos dados IGC

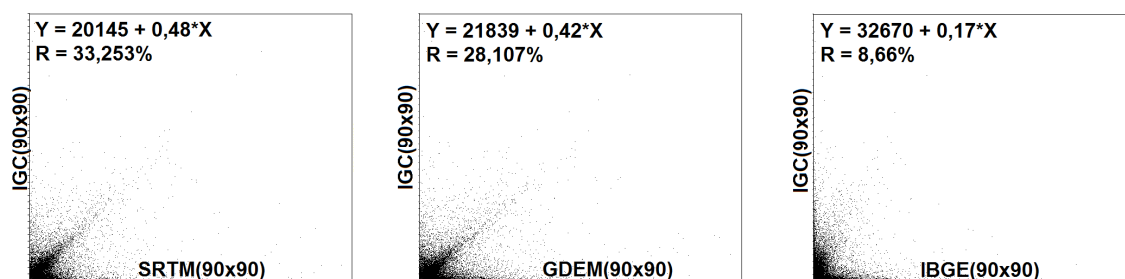


Figura 4.8 – Análise de regressão dos valores de área de captação contidos nos MDE gerados com base nos dados SRTM, GDEM e IBGE em relação aos derivados dos dados IGC

Comparando as variáveis utilizadas para o cálculo do fator topográfico, utilizando os resultados obtidos com base nos MDE derivados dos dados IGC como referência de precisão, pode-se notar que as variáveis topográficas locais derivadas de primeira ordem, declividade ' θ ' e aspecto ' ϕ ', calculadas a partir dos MDE gerados com base nos diferentes dados altimétricos apresentam maior correlação do que a variável hidrológica área de captação ' A '.

Isto se deve ao fato de que as variáveis locais, declividade ' θ ' e aspecto ' ϕ ', são calculadas a partir dos valores de altitude das células da vizinhança próxima, enquanto que a área de captação ' A ' depende dos valores de altitude de todas as células constituintes da área de contribuição da célula em análise. Desta forma, a utilização de diferentes dados altimétricos para a geração de MDE visando à modelagem da erosão apresenta influências distintas no cálculo do fator ' L ' e fator ' S ' e consequentemente no fator topográfico ' LS ' empregado na USLE.

4.1.1. Fator L

O fator ' L ' é influenciado pela concentração do fluxo modelado e por isto apresenta os maiores valores nas áreas de convergência do fluxo. As diferenças observadas nos resultados do fator ' L ', ilustrados na Figura 4.9 e Figura 4.10, ocorrem devido à utilização dos diferentes algoritmos de distribuição do fluxo utilizados para o cálculo da área de captação. A Figura 4.9 ilustra o fator ' L ' *D8* (calculado utilizando o algoritmo *Deterministic 8*), enquanto que a Figura 4.10 representa o fator ' L ' *MFD* (calculado utilizando o algoritmo *Multiple Flow Direction*).

Estes algoritmos diferenciam-se em algoritmo de fluxo simples e algoritmo de fluxo múltiplo e deste modo, as grades do fator ' L ' calculada a partir destes algoritmos permitem modelar o potencial erosivo da topografia considerando diferentes formas de distribuição do fluxo do escoamento superficial sobre as células dos MDE.

O fator ' L ' *D8* permite modelar o potencial erosivo do escoamento superficial convergente, desta forma, as áreas com elevados valores de fator ' L ' correspondem às linhas de concentração do fluxo sobre as células do MDE, conforme os resultados apresentados por Desmet e Govers (1996b).

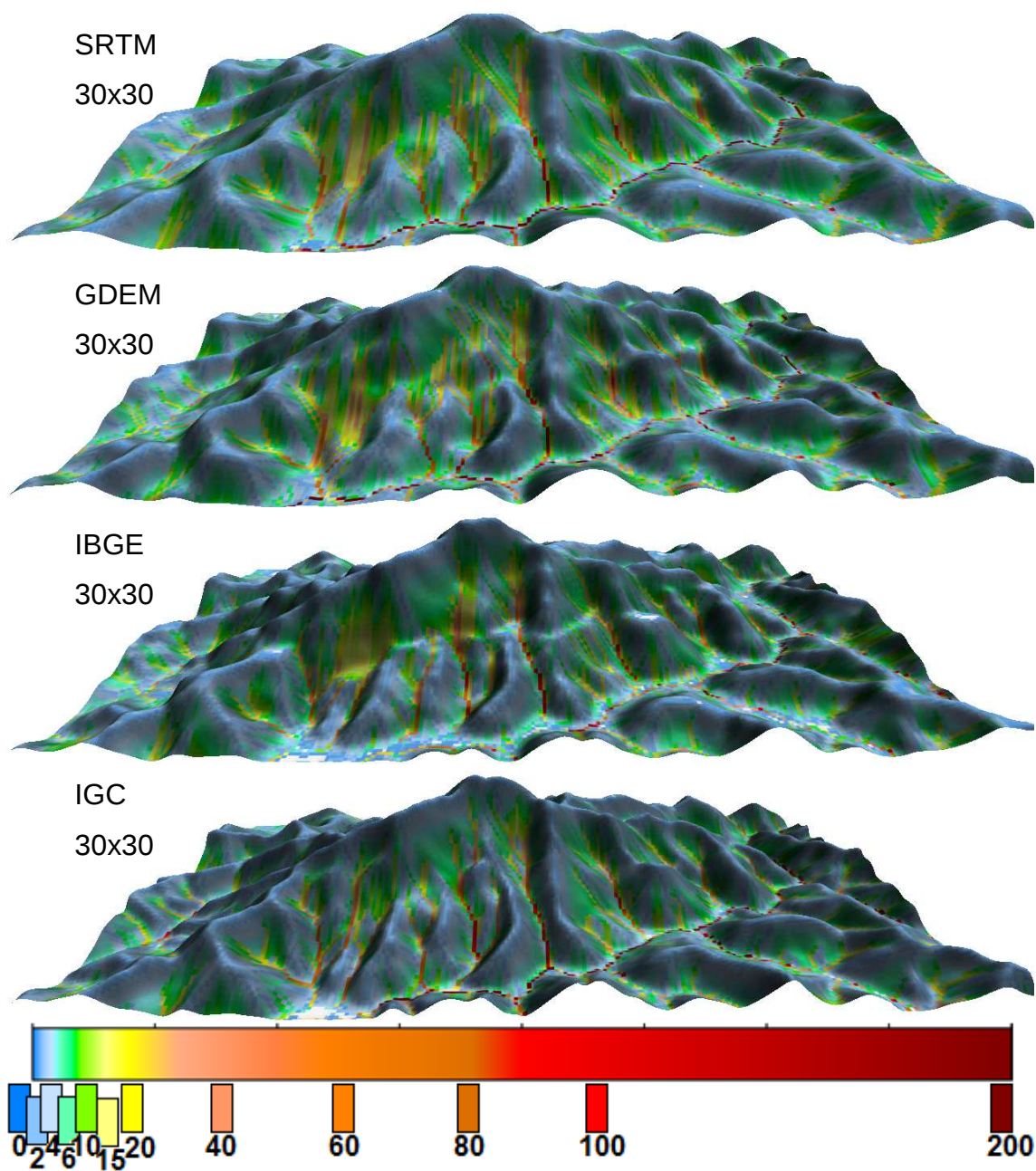


Figura 4.9 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'L' D8 no Morro Grande

O fator 'L' *MFD* possibilita a modelagem do potencial erosivo do fluxo convergente e divergente, deste modo, o potencial erosivo do escoamento superficial apresenta-se distribuído nas células do MDE.

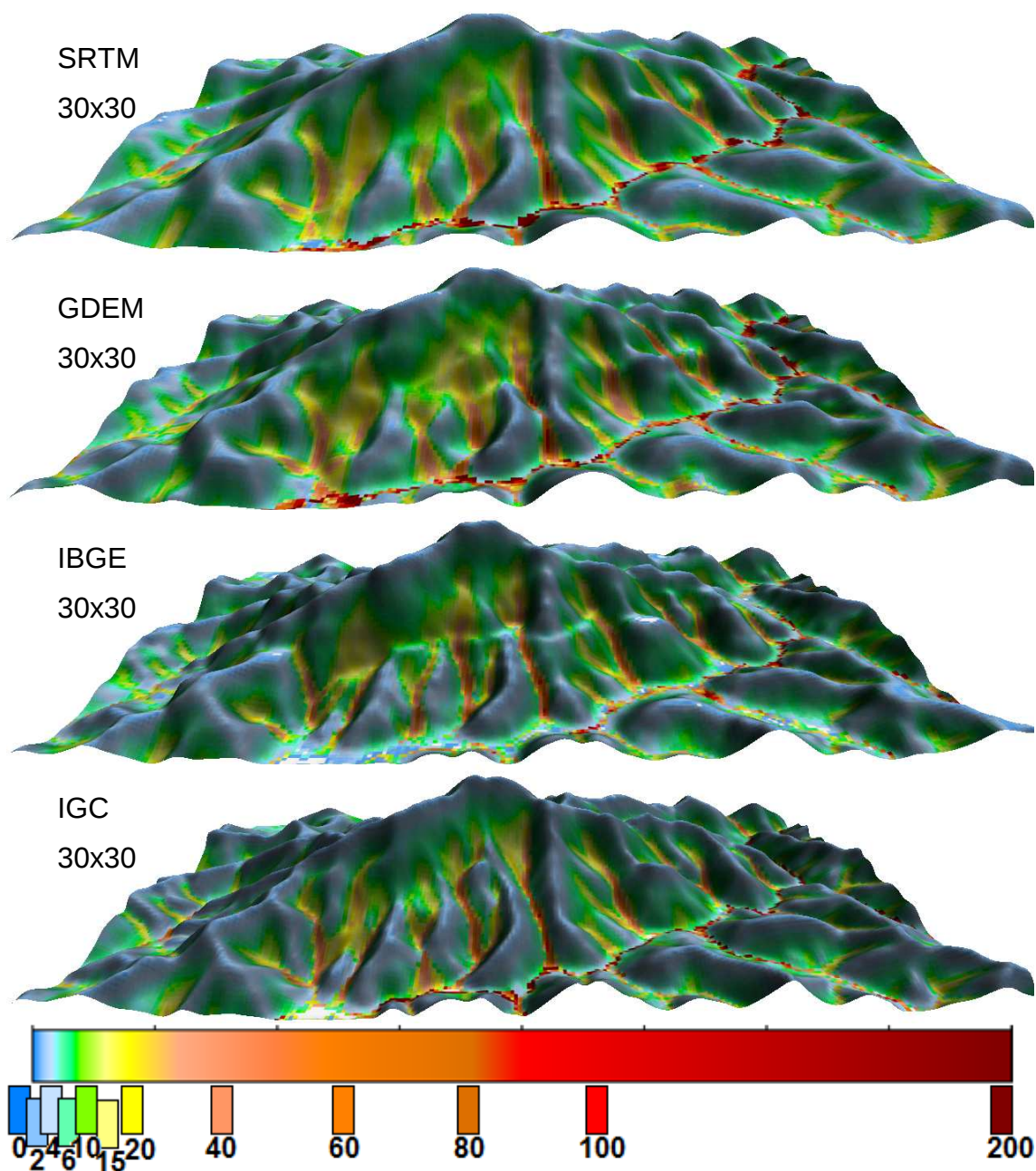


Figura 4.10 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'L' MFD no Morro Grande

As grades do fator 'L' D8 e as grades do fator 'L' MFD apresentam diferentes distribuições de valores, conforme apresentado no Apêndice A, sendo que as grades do fator 'L' MFD apresentam dispersão de valores, média e desvio

padrão maiores do que as grades do fator 'L' D8. A grade do fator 'L' D8 IBGE 30x30 (calculada a partir do MDE gerado a partir dos dados do IBGE com espaçamento de grade de 30m x 30m) apresentou a menor média (5,87), enquanto que a grade do fator 'L' MFD GDEM 90x90 apresentou a maior média (20,13). Pode-se observar que de maneira geral os MDE IBGE resultaram os menores valores do fator 'L' e os MDE GDEM os maiores valores. Foi observado que o aumento do espaçamento da grade tende a elevar os valores das medidas de tendência e de dispersão, tornando as distribuições de valores do fator 'L' mais semelhantes.

Além disto, os resultados da análise de regressão das grades do fator 'L' apresentados no Apêndice B demonstraram que as grades do fator 'L' MFD calculadas a partir dos diferentes MDE apresentam maior semelhança com as grades do fator 'L' MFD calculadas a partir dos MDE IGC. Isto ocorre, pois o fluxo modelado pelo D8 é mais sensível às variações da superfície do MDE. A grade do fator 'L' D8 IBGE 30x30 foi a que apresentou a menor correlação ($r = 0,12$) com a grade de referência (fator 'L' D8 IGC 30x30), enquanto que as grades do fator 'L' calculadas a partir dos MDE gerados com base nos dados SRTM e GDEM apresentaram as maiores correlações. Desta forma, a grade do fator 'L' MFD SRTM 90x90 apresentou a maior correlação ($r = 0,64$) seguida da grade do fator 'L' MFD GDEM 90x90, com correlação de ($r = 0,57$) em relação à grade de referência (fator 'L' MFD IGC 90x90). Foi verificado que o aumento do espaçamento da grade tende a elevar os valores do coeficiente de correlação resultantes da análise de regressão.

Observou-se que as grades de área de captação 'A' apresentam resultados mais parecidos quanto maior a convergência das superfícies dos MDE, favorecendo a representação das áreas com topografias que apresentam alto potencial erosivo. Isto ocorre, pois as semelhanças entre as grades da variável área de captação 'A', utilizadas para modelar o fator 'L', aumentam conforme a curvatura horizontal e o espaçamento da grade aumentam. Estes resultados

são semelhantes aos obtidos na comparação entre diferentes algoritmos de distribuição do fluxo realizada por Erskine et al. (2006).

4.1.2. Fator S

O fator 'S' é determinado pela declividade local, a Figura 4.11 representa a distribuição espacial do fator 'S' na região do Morro Grande na bacia do Una. O fator 'S' apresenta os maiores valores nas encostas declivosas e os menores valores nas áreas planas ou menos declivosas.

A utilização de outros métodos para o cálculo da declividade pode resultar em diferenças nos resultados, conforme discutido em Li et al. (2005), e consequentemente influenciar no cálculo do fator 'S'. Entretanto estas diferenças não são tão significativas como a utilização de diferentes algoritmos de distribuição do fluxo para o cálculo do fator 'L' e não foram analisadas neste trabalho.

Pode ser observado que o aumento do espaçamento da grade do MDE reduz a amplitude de variação das distribuições de valores das grades do fator 'S'. Isto ocorre devido ao fato de que os valores máximos de declividade são suavizados em função do aumento da distância horizontal referente ao espaçamento da grade 'D' utilizado no cálculo da declividade, enquanto que os valores mínimos são aumentados em virtude da inclusão de áreas declivosas adjacentes, conforme observado nos resultados apresentados por Cavalli e Valeriano (2000).

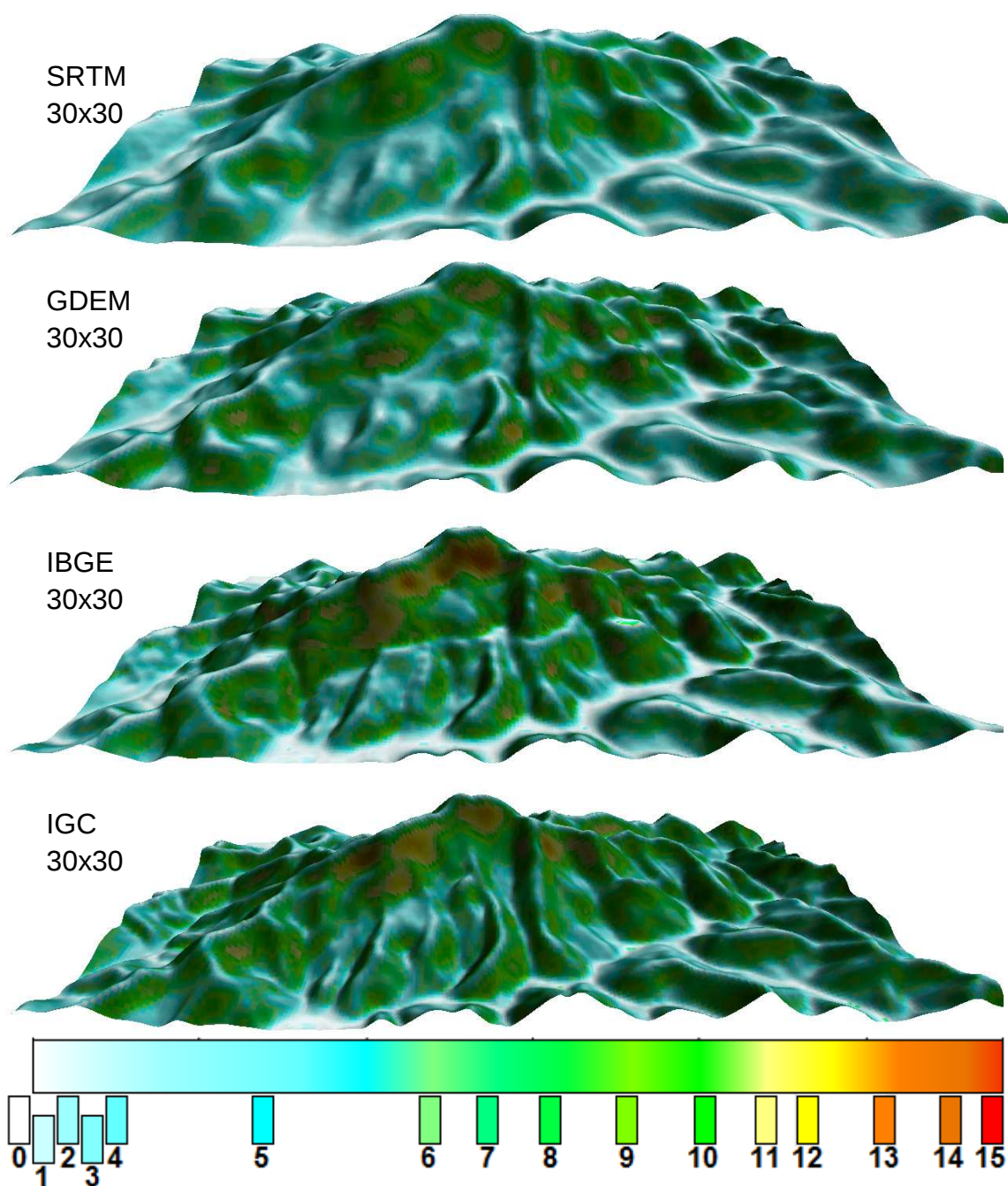


Figura 4.11 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'S' na região do Morro Grande

As grades do fator 'S' calculadas a partir dos distintos *MDE* apresentam diferentes distribuições de valores, conforme apresentado no Apêndice A. A grade do fator 'S' IBGE 90x90 apresentou a menor média (2,53), enquanto que

a grade do fator 'S' IGC 30x30 apresentou a maior média (4,43). Entretanto, pode-se observar que de maneira geral os MDE SRTM resultaram os menores valores do fator 'S' e os MDE IGC e GDEM os maiores valores. Foi observado que o aumento do espaçamento da grade tende a diminuir os valores das medidas de tendência e de dispersão, reduzindo a amplitude das distribuições de valores do fator 'S'.

Os resultados da análise de regressão das grades do fator 'S' apresentados no Apêndice B demonstram que as grades do fator 'S' calculadas a partir dos diferentes MDE são mais semelhantes e apresentam coeficientes de correlação maiores do que os verificados nas grades do fator 'L'. Isto ocorre, pois o fator 'S' é calculado utilizando apenas a variável local declividade ' θ ', enquanto que o fator 'L' é calculado, basicamente, a partir da variável área de captação 'A' considerando ainda as variáveis locais, declividade ' θ ' e aspecto ' ϕ '.

A grade do fator 'S' IBGE 30x30 foi a que apresentou a menor correlação ($r = 0,54$) com a grade de referência (fator 'S' IGC 30x30), enquanto que as grades do fator 'S' calculadas a partir dos MDE gerados com base nos dados SRTM e GDEM apresentaram maiores correlações. Deste modo, a grade do fator 'S' SRTM 90x90 apresentou a maior correlação ($r = 0,92$) seguida da grade do fator 'S' GDEM 90x90, com correlação de ($r = 0,88$) em relação à grade de referência (fator 'S' IGC 90x90). Nota-se que o aumento do espaçamento da grade favoreceu o aumento dos valores dos coeficientes de correlação resultantes da análise de regressão.

4.1.3. Fator LS

O fator 'L' modela a concentração do fluxo na superfície do terreno enquanto que o fator 'S' modela a energia potencial do fluxo gerada pelo gradiente de declividade. O fator topográfico 'LS', correspondente ao produto entre o fator 'L' e o fator 'S', permite modelar o potencial erosivo referente às características

topográficas do terreno representadas pelo MDE. Deste modo, o fator 'L' apresenta os máximos valores nas áreas de concentração do fluxo, como em vertentes convergentes, canais e vales, porém o fator 'LS' destas áreas pode ser reduzido se o fator 'S' for baixo. Da mesma forma, nas vertentes onde o fator 'L' é baixo por ocorrer pouca concentração do fluxo, mas o fator 'S' é expressivo devido à alta declividade, o fator 'LS' pode apresentar valores elevados. A Figura 4.12 representa a distribuição espacial do fator 'LS' MFD.

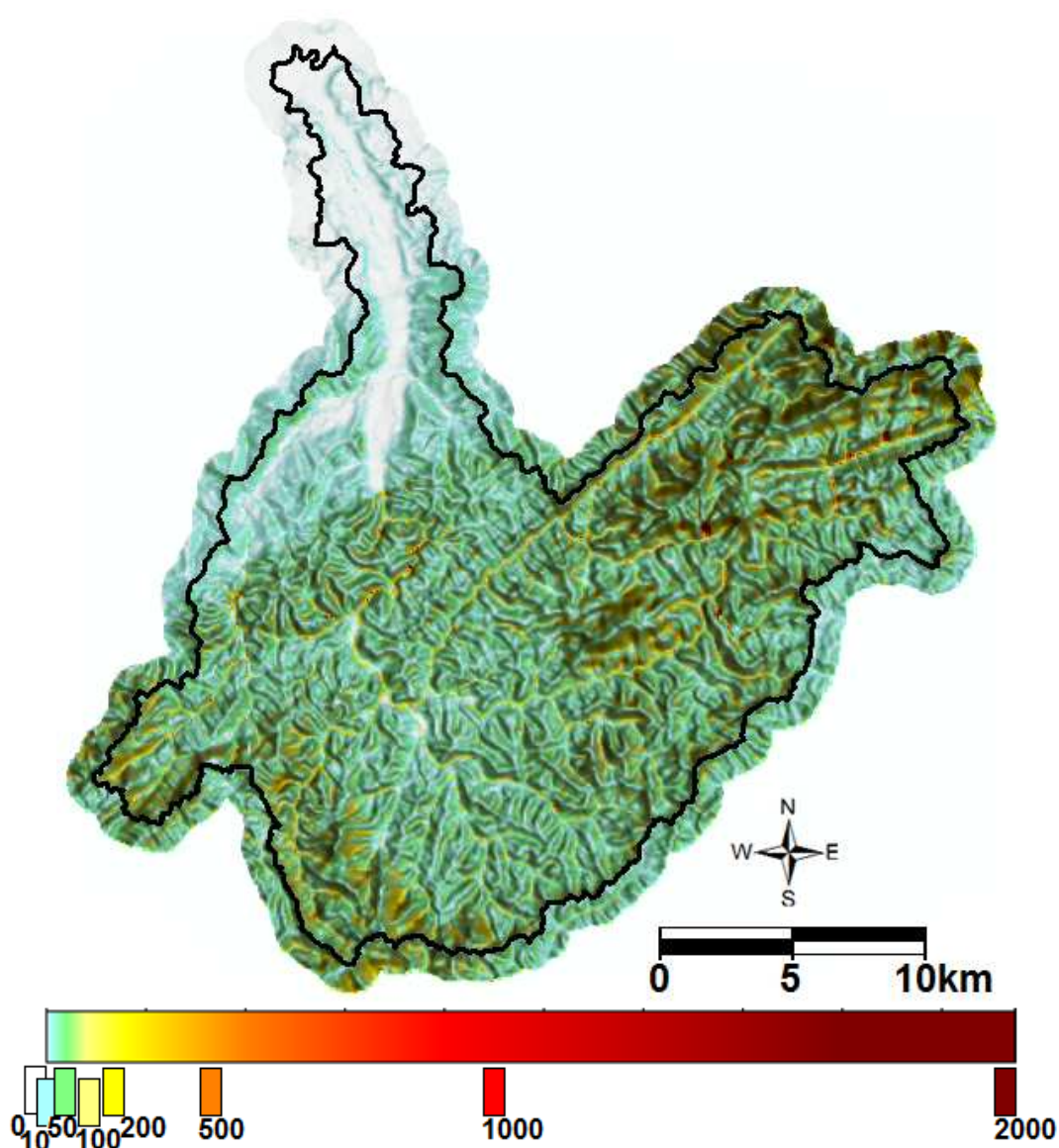


Figura 4.12 – Representação do relevo sombreado sobreposto pela distribuição espacial do fator 'LS' MFD IGC 90x90 na bacia do rio Una

A distribuição espacial do fator topográfico permite identificar as regiões da bacia do rio Una com características topográficas favoráveis à intensificação dos processos erosivos causados pelo fluxo do escoamento superficial.

As diferenças observadas nos resultados do fator '*LS*', ilustrados na Figura 4.13 e Figura 4.14, ocorrem devido à utilização das diferentes grades do fator '*L*' calculadas por meio dos algoritmos de modelagem do fluxo *D8* e *MFD*, utilizados para o cálculo da área de captação.

As grades do fator '*LS*' *D8* e as grades do fator '*LS*' *MFD* possuem distribuições de valores com diferentes características, conforme apresentado no Apêndice A, sendo que as grades do fator '*L*' *MFD* apresentam dispersão de valores, média e desvio padrão maiores do que as grades do fator '*LS*' *D8*. Isto ocorre devido às características do fator '*L*' utilizado para calcular o fator topográfico. A grade do fator '*LS*' *D8* SRTM 30x30 apresentou a menor média (18,79), enquanto que a grade do fator '*LS*' *MFD* GDEM 90x90 apresentou a maior média (59,13). Pode-se observar que os MDE SRTM e IBGE resultaram os menores valores do fator '*LS*' e os MDE GDEM e IGC os maiores valores.

A comparação realizada por Datta e Kirchner (2010), de diferentes MDE para o cálculo do fator topográfico '*LS*' em uma bacia hidrográfica no Himalaia indiano apresentou resultados pouco diferentes aos obtidos nesta pesquisa. Entretanto, as metodologias utilizadas para o cálculo do fator '*LS*' apresentam variações significantes. Dentre estas, ressalta-se a utilização da variável comprimento do fluxo, também obtida a partir de algoritmos de distribuição do fluxo, mas diferente da variável área de captação específica, para a substituição da variável comprimento de rampa. Entretanto, conforme os resultados apresentados por Datta e Kirchner (2010), os valores do fator '*LS*' derivados de MDE gerados a partir dos dados SRTM são mais semelhantes aos valores medidos em campo do que os valores obtidos com base nos MDE derivados

dos dados ASTER ou gerados a partir de dados cartográficos de escala 1:50.000.

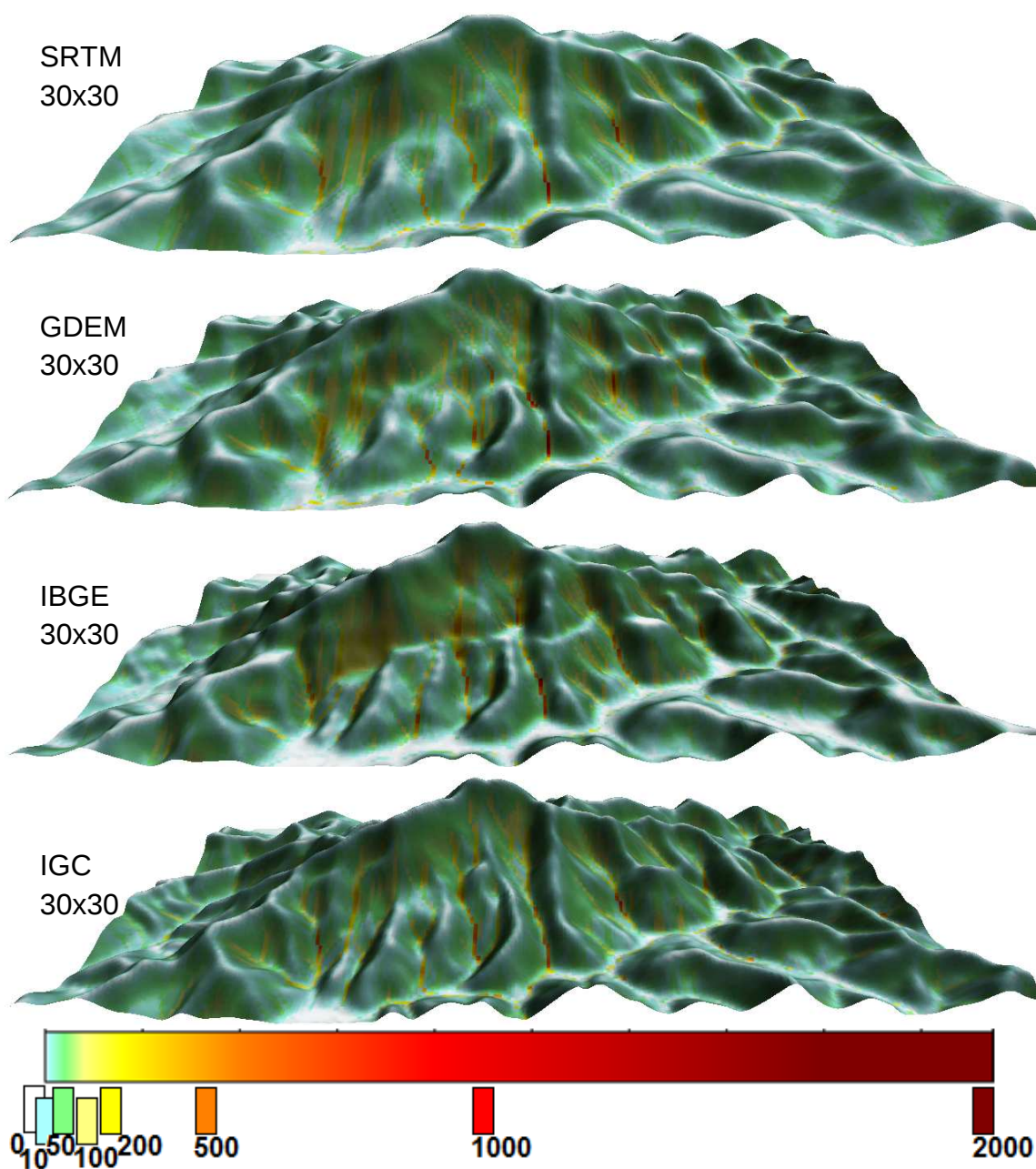


Figura 4.13 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'LS' D8 no Morro Grande

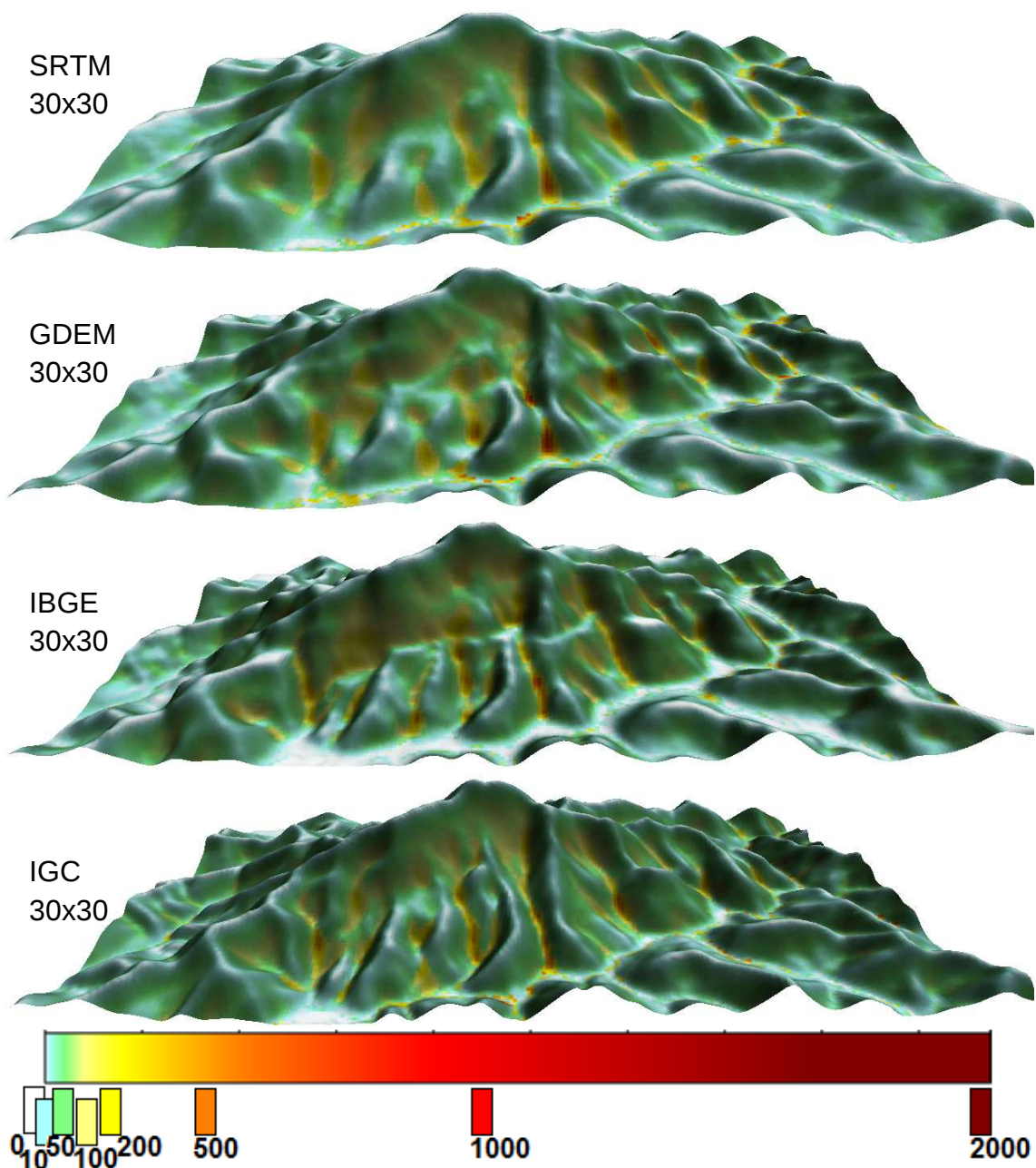


Figura 4.14 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D e do fator 'LS' *MFD* no Morro Grande

As análises de regressão das grades do fator 'LS' apresentadas no Apêndice B demonstram que as grades do fator 'LS' *MFD* calculadas a partir dos diferentes MDE apresentam maiores semelhanças com as grades de referência (fator 'LS' IGC) do que as grades do fator 'LS' *D8* calculadas a partir dos diferentes MDE.

Isto ocorre, pois o potencial erosivo modelado pelo fator 'L' D8 é mais sensível às características da superfície do MDE, enquanto que o potencial erosivo modelado pelo fator 'L' MFD apresenta-se distribuído nas células do MDE.

A grade do fator 'LS' D8 IBGE 30x30 foi a que apresentou a menor correlação ($r = 0,32$) com a grade de referência (fator 'LS' D8 IGC 30x30), enquanto que as grades do fator 'LS' calculadas a partir dos MDE gerados com base nos dados SRTM e GDEM apresentaram as maiores correlações. Desta forma, a grade do fator 'L' MFD SRTM 90x90 apresentou a maior correlação ($r = 0,78$) seguida da grade do fator 'L' MFD GDEM 90x90 ($r = 0,65$) em relação à grade de referência (fator 'LS' MFD IGC 90x90).

Apesar de visualmente pouco perceptível, o espaçamento da grade do MDE influencia nos resultados do fator topográfico 'LS'. A Figura 4.15 ilustra uma vertente modelada com base nas superfícies dos MDE IGC utilizando diferentes espaçamentos de célula de 30m x 30m, 60m x 60m e 90m x 90m, a Figura 4.16 representa a distribuição espacial do fator 'LS' D8 e a Figura 4.17 a distribuição espacial do fator 'LS' MFD calculados com base nestas superfícies.

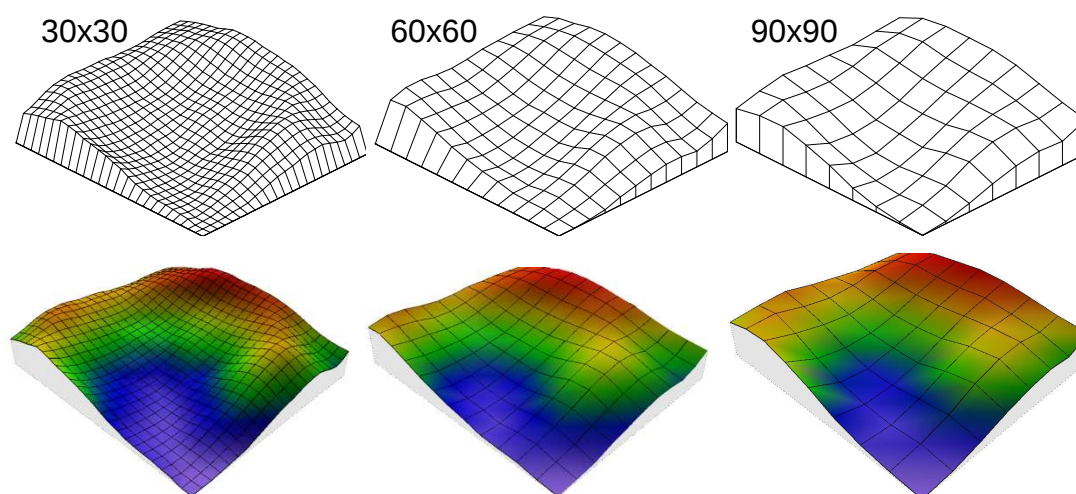


Figura 4.15 – Representação em perspectiva 3D dos diferentes espaçamentos de grade utilizados e características das superfícies geradas

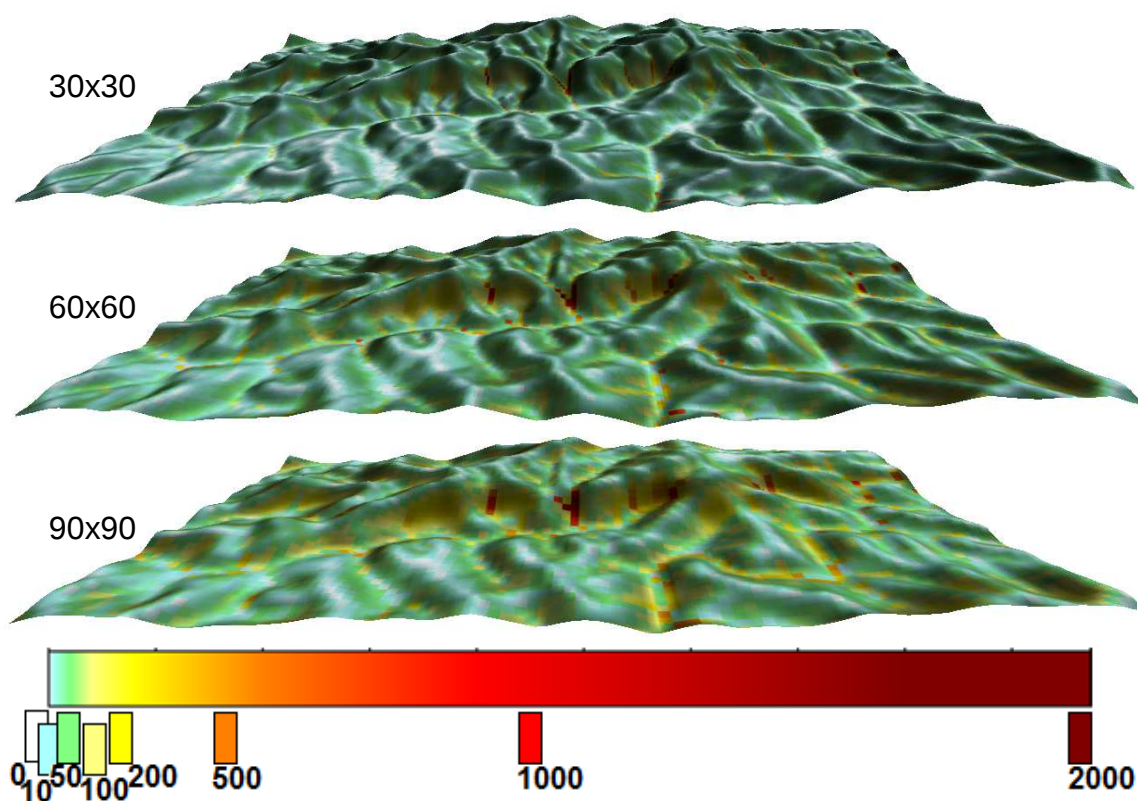


Figura 4.16 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D sobreposto pelo fator 'LS' D8 IGC calculado utilizando diferentes espaçamentos de grade em uma região no interior da bacia do Una

Nota-se que o aumento do espaçamento favoreceu a correlação entre as grades do fator 'LS' calculadas a partir dos diferentes MDE. Observa-se que o aumento do espaçamento da grade tende a elevar os valores das medidas de tendência central e de dispersão, tornando os valores do fator 'LS' calculados a partir dos diferentes MDE mais parecidos. Os resultados apresentados por Erskine et al. (2006) também evidenciam a influência do espaçamento da grade na distribuição dos valores de área de captação e demonstram a tendência de generalização dos resultados e consequente aumento da similaridade entre os valores obtidos a partir de diferentes algoritmos de distribuição de fluxo.

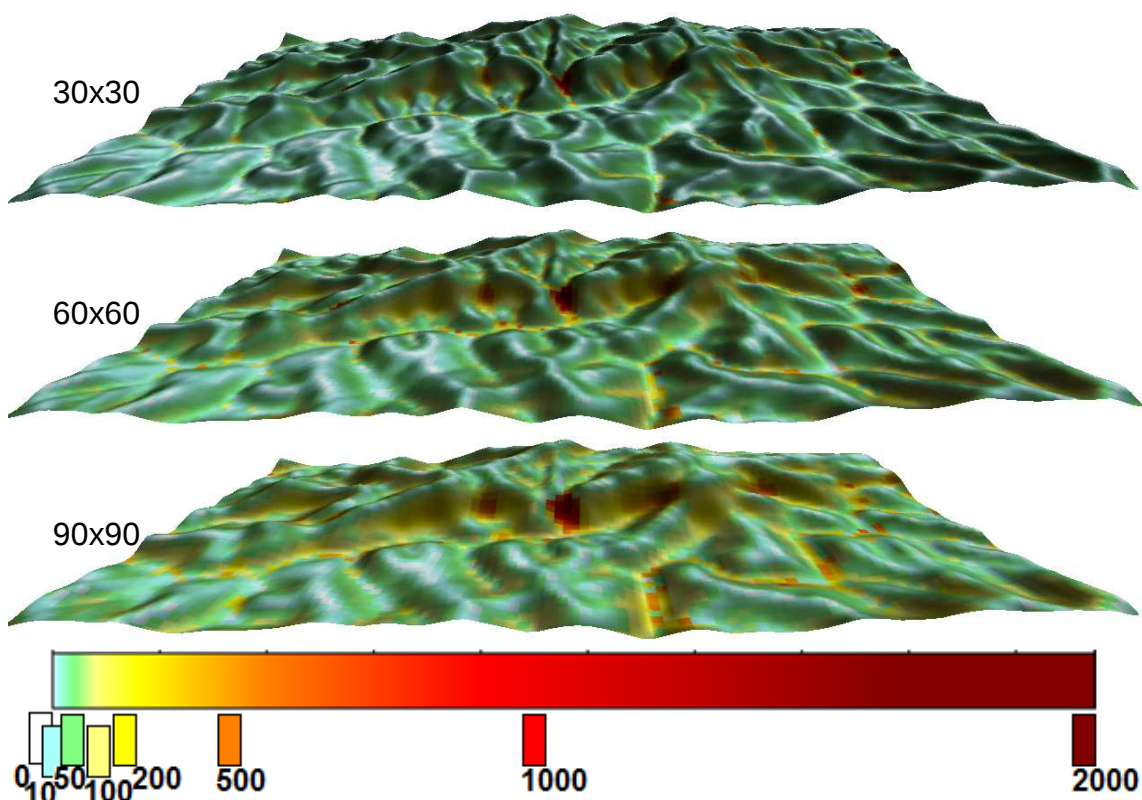


Figura 4.17 – Representação do relevo sombreado em perspectiva 3D sobreposto pelo fator 'LS' MFD IGC calculado utilizando diferentes espaçamentos de grade em uma região no interior da bacia do Una

Apesar de a diminuição do espaçamento da grade conduzir a uma menor frequência dos valores elevados do fator 'LS' e redução da média geral, verificou-se a ocorrência das maiores amplitudes nos valores do fator 'LS' obtidos com base nos MDE com espaçamento de grade diminuído. Entretanto, nota-se que os MDE com espaçamento de grade de 90x90, contribuem para a generalização das áreas com características topográficas favoráveis à erosão hídrica, conforme ilustrado na Figura 4.16 e Figura 4.17, beneficiando a identificação das áreas com características topográficas mais susceptíveis aos processos erosivos.

Embora os valores do fator 'LS' calculado a partir dos MDE com menor espaçamento de grade apresentarem maiores diferenças em relação ao fator 'LS' de referência e resultar em coeficientes de correlação menores, é possível

observar que os MDE gerados a partir dos dados de SR orbital, SRTM e GDEM, possibilitaram obter resultados mais próximos aos conseguidos a partir dos dados cartográficos do IGC com escala 1:10.000 do que os MDE gerados a partir dos dados cartográficos do IBGE com escala 1:50.000. Este melhor desempenho dos MDE SRTM e GDEM em relação aos MDE IBGE foi observado no cálculo de todas as variáveis utilizadas para o cálculo do fator topográfico e consequentemente na estimativa do fator 'L', fator 'S' e fator 'LS'.

A metodologia utilizada para a geração dos MDE hidrologicamente corrigidos favoreceu o cálculo das variáveis topográficas empregadas na modelagem do fator topográfico, permitindo modelar a distribuição do fluxo nos MDE isentos de células capazes de causar a interrupção do fluxo. Embora os MDE gerados a partir dos diferentes dados altimétricos permitam representar as feições topográficas da área de estudo de modo similar, foi possível avaliar as diferenças causadas na distribuição do fator topográfico devido à utilização dos diversos MDE utilizados e diferentes tipos de algoritmos empregados para a modelagem do potencial erosivo do fluxo do escoamento superficial. Verificou-se que, apesar das limitações dos dados altimétricos obtidos por SR orbital, estes se mostraram mais eficazes na modelagem do fator topográfico na bacia do rio Una do que os dados cartográficos altimétricos de escala 1:50.000.

4.1.3.1. Distribuição espacial dos erros

Os MDE utilizados para o cálculo do fator topográfico apresentaram diferentes potenciais para a representação das feições topográficas. Os MDE derivados dos dados SRTM e GDEM apresentaram grande eficácia na modelagem do fator topográfico, entretanto as diversas características das superfícies destes MDE resultam em diferentes distribuições dos erros quando comparados a uma referência de precisão. A análise da distribuição espacial dos resíduos absolutos possibilitou identificar as principais diferenças entre os resultados do fator topográfico obtido a partir dos diferentes MDE em relação ao fator

topográfico obtido com base no MDE de referência. A Figura 4.18 representa, de maneira geral, a distribuição espacial do resíduo absoluto calculado a partir da diferença entre o valor observado na grade do fator 'LS' MFD obtido a partir dos diferentes MDE (SRTM, GDEM e IBGE) e o fator 'LS' MFD IGC.

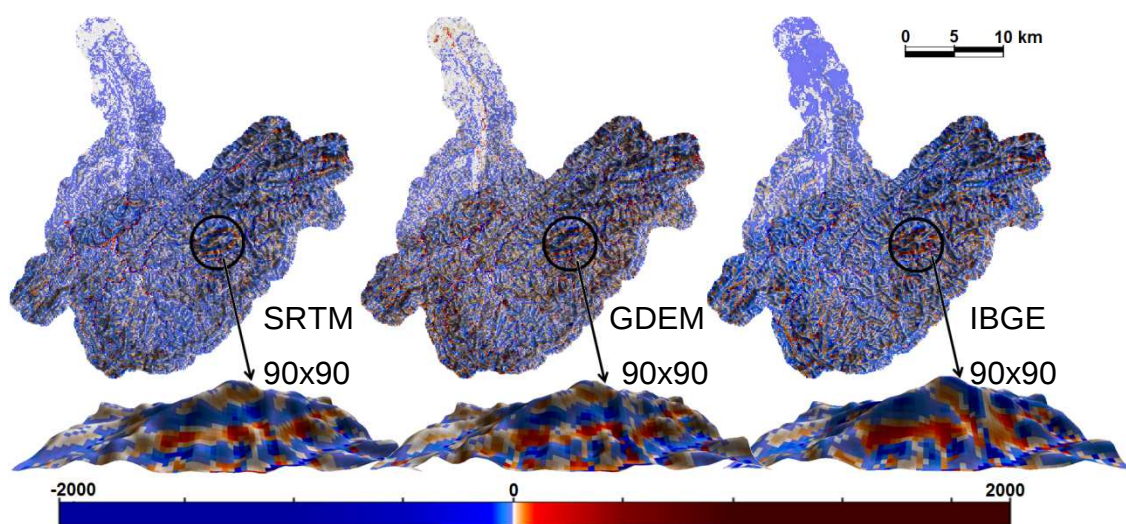


Figura 4.18 – Distribuição espacial do resíduo absoluto calculado com base nas grades do fator topográfico 'LS' MFD 90x90 na bacia do rio Una e visualização em perspectiva 3D do Morro Grande

Analisando as distribuições de valores do resíduo padronizado, apresentadas no Apêndice C, pode-se notar que os valores do fator 'LS' calculados com base nos MDE SRTM apresentam valores menores que os calculados com base nos MDE IGC. Os valores do fator 'LS' calculados com base nos MDE GDEM são, em geral, mais elevados do que os calculados com base nos MDE SRTM e IBGE, sendo que nos MDE com espaçamento de grade de 90m x 90m os valores do fator 'LS' GDEM apresentaram-se maiores do que a referência (fator 'LS' IGC). Conforme visualizado na representação espacial do resíduo absoluto ilustrada na Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20, nas áreas planas da bacia estão localizados os menores valores do fator 'LS' e também as menores diferenças entre os resultados, enquanto que nas áreas com relevo acidentado os maiores erros foram verificados nas áreas com declividade acentuada, nos

canais e vales, enquanto que nos interflúvios onde a concentração do fluxo e a declividade são baixas as diferenças entre os resultados são menores.

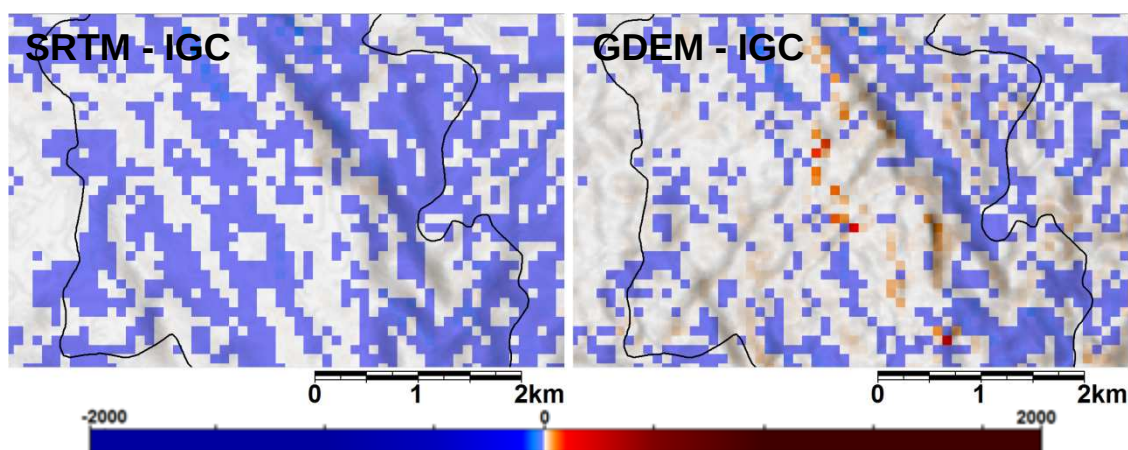


Figura 4.19 – Distribuição espacial do resíduo absoluto calculado com base nas grades 90x90 do fator topográfico '*LS*' *MFD* SRTM e GDEM na região plana da bacia do rio Una

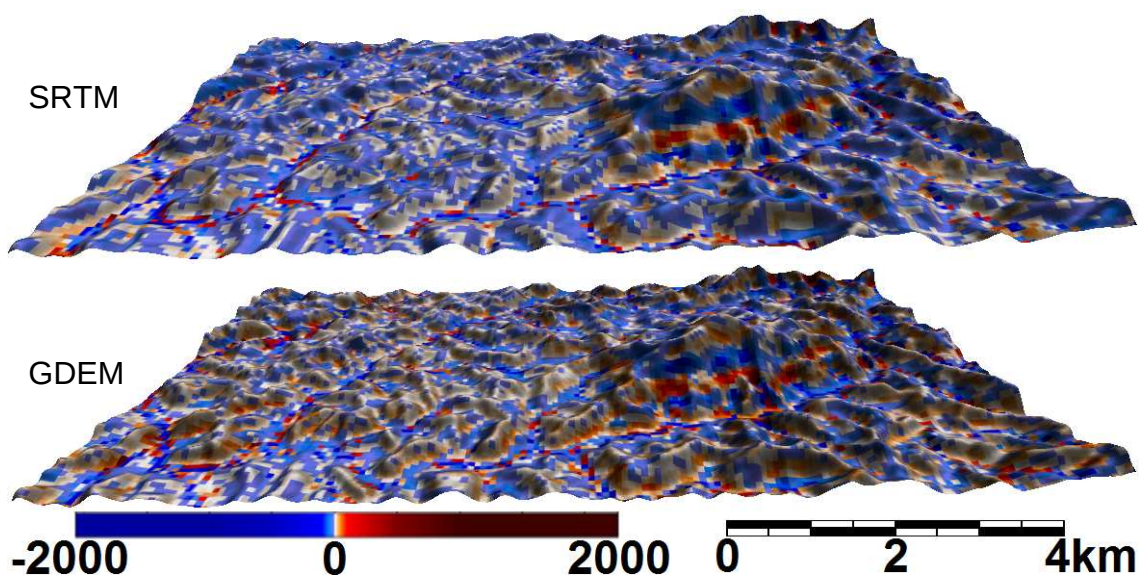


Figura 4.20 – Distribuição espacial do resíduo absoluto calculado com base nas grades 90x90 do fator topográfico '*LS*' *MFD* SRTM e GDEM na região de relevo acidentado na bacia do rio Una

Analisando a distribuição espacial dos resíduos absolutos e as distribuições de valores do resíduo padronizado apresentadas no Apêndice C, observa-se que

a distribuição dos valores resultantes da diferença entre a grades do fator 'LS' MFD SRTM e a grade do fator 'LS' MFD IGC apresenta média menor que zero (-3,4), enquanto que a distribuição dos valores resultantes da diferença entre a grade do fator 'LS' MFD GDEM e a grade do fator 'LS' MFD IGC apresenta média maior que zero (3,8). Os resultados verificados na distribuição dos valores da diferença entre a grades do fator 'LS' MFD IBGE e a grade do fator 'LS' MFD IGC apresentaram a menor média (-8,3).

De maneira geral, os MDE SRTM subestimam os valores do fator topográfico, porém permitem estimativas mais precisas do que os MDE GDEM e IBGE. De outra forma, os MDE GDEM, em média, favorecem a estimativa de valores do fator topográfico maiores que os dados SRTM e IBGE, entretanto podem apresentar resultados superestimados do fator topográfico em áreas planas devido à grande quantidade de artefatos presentes nos dados GDEM nestas regiões.

Os resultados obtidos com base nos MDE SRTM possuem as distribuição de valores do resíduo padronizado com menor dispersão, enquanto que os resultados obtidos com base nos MDE IBGE apresentaram as maiores diferenças em relação ao MDE IGC utilizado como referência de precisão.

Analisando os histogramas das distribuições de valores do resíduo absoluto do fator topográfico ilustrados na Figura 4.21, podem ser percebidas as dispersões dos resultados gerados a partir dos MDE SRTM, GDEM e IBGE em relação aos obtidos com base no MDE IGC. Pôde-se perceber que os dados SRTM e GDEM permitiram obter valores do fator 'LS' mais próximos aos derivados dos dados IGC com escala de 1:10.000, enquanto que os dados IBGE com escala 1:50.000 geraram valores do fator 'LS' mais divergentes. Esta característica pode ser confirmada pela análise das distribuições dos resíduos padronizados apresentadas no Apêndice C.

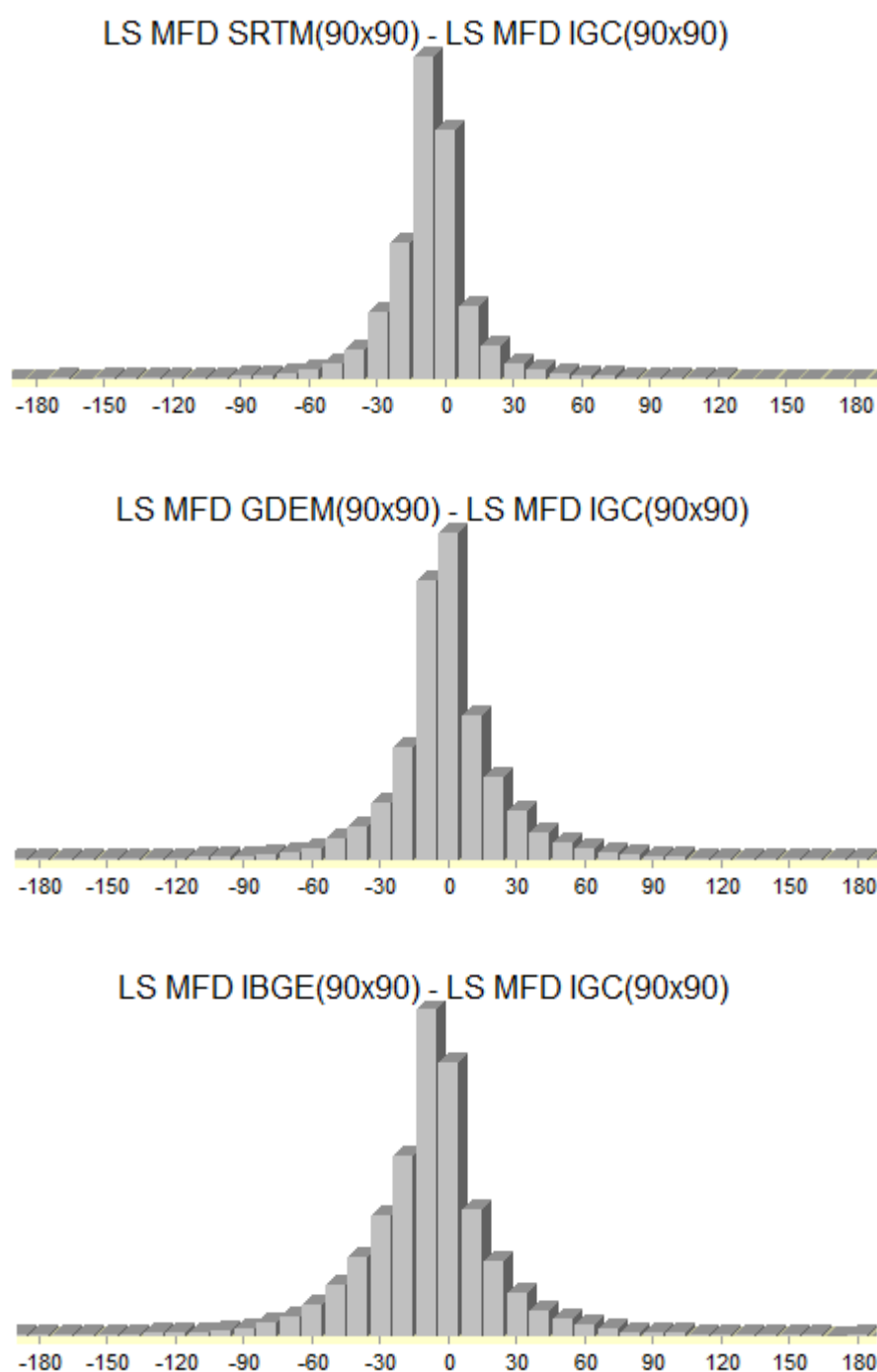


Figura 4.21 – Histogramas representando as distribuições de valores do resíduo absoluto calculado com base nas grades 90x90 do fator topográfico 'LS' MFD SRTM, GDEM e IBGE

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os dados, os materiais e os métodos utilizados na presente pesquisa, foi possível chegar a algumas conclusões, sendo as principais as que se seguem: os dados altimétricos obtidos por SR orbital e disponibilizados publicamente para todo o território nacional, SRTM e GDEM, possibilitaram estimar o fator topográfico empregado no modelo USLE com apropriada precisão. Os dados SRTM e GDEM permitem a geração de MDE hidrologicamente corrigidos, adequados ao cálculo das variáveis topográficas empregadas na modelagem do fator topográfico.

Os resultados obtidos a partir dos MDE SRTM e GDEM apresentaram-se mais coerentes com os resultados obtidos a partir dos dados cartográficos do IGC com escala 1:10.000 do que com os resultados obtidos a partir dos dados cartográficos do IBGE com escala 1:50.000. Além disto, os resultados obtidos a partir dos MDE derivados dos dados SRTM e GDEM são mais semelhantes aos obtidos com base nos dados cartográficos do IGC com escala 1:10.000 do que os resultados possibilitados pela utilização dos dados cartográficos do IBGE com escala 1:50.000.

Os dados SRTM possibilitam a modelagem do fator topográfico com maior precisão do que os dados GDEM, inclusive nas áreas mais planas onde os dados GDEM apresentam grande quantidade de artefatos que prejudicam a modelagem da distribuição do fluxo. As áreas com relevo acidentado apresentam maiores diferenças entre os resultados obtidos a partir dos diferentes MDE.

Os algoritmos de distribuição de fluxo utilizados para a modelagem do fator topográfico, *Deterministic 8* e *Multiple Flow Direction*, apresentaram diferentes potenciais para a modelagem dos processos erosivos. Entretanto, o algoritmo

Multiple Flow Direction favoreceu resultados mais coerentes entre os diferentes MDE avaliados.

O espaçamento da grade do MDE influencia no cálculo das variáveis topográficas utilizadas na modelagem do fator topográfico e consequentemente afeta nos resultados do fator 'L', fator 'S' e fator 'LS'. A redução do espaçamento da grade altera a distribuição dos valores do fator topográfico e, portanto, pode influenciar na identificação das áreas mais susceptíveis aos processos erosivos. Deste modo, o aumento do espaçamento da grade resultou em valores do fator topográfico mais elevados e permitiu distribuições de valores mais semelhantes, obtidas a partir dos diferentes MDE utilizados.

Apesar dos esforços para o aprimoramento da modelagem do fator topográfico da USLE a partir dos dados de Sensoriamento Remoto utilizando as ferramentas de geoprocessamento, muitas questões ainda necessitam ser consideradas em possíveis pesquisas futuras. Dentre estas, destaca-se a análise da influência dos diferentes métodos para o cálculo da declividade e aspecto e outros diferentes algoritmos de distribuição do fluxo para o cálculo da área de captação, na modelagem do fator topográfico. Estas análises idealmente devem ser realizadas avaliando a aplicação de dados altimétricos de alta precisão comparados com dados de perda de solo coletados em campo, visando uma validação quantitativa dos diferentes métodos para modelagem do fator topográfico da USLE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTER GDEM VALIDATION TEAM: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAAC, USGS/EROS. **ASTER Global DEM validation summary report**. 2009. 28 p. Disponível em: <http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf>. Acesso em: 1 de abr 2010.

BATISTA, G.T., TARGA, M. S., FIDALGO, E. C. C. Banco de dados ambientais da Bacia do Rio Una, Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Repositório eletrônico ciências ambientais, coleção recursos hídricos**. Universidade de Taubaté. 2006.

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

BÖHNER, J.; CONRAD, O. (Coord.). **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)**. Versão 2.0.5. Hamburg: Institute of Geography at the University of Hamburg, 2009.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades do solo**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 878 p.

BRASIL. Decreto- lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 2438, fev. 1967.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 8884, jun. 1984.

BRASIL. Decreto nº 5.334, de 6 de janeiro de 2005. Dá nova redação ao art. 21 e revoga o art. 22 do Decreto no 89.817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, p. 1, jan. 2005.

BUNDELA, D. S. **Influence of digital elevation models derived from remote sensing on spatio-temporal modelling of hydrologic and erosion processes**. 2004. 370 p. Tese (Doutorado em Ciências do solo) - Cranfield University, Bedfordshire, 2004.

CAI, X.; WANG, D. Spatial autocorrelation of topographic index in catchments. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 581– 591, 2006.

- CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. A.; CÂMARA, G.; DAVIS JR., C.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. (Ed.). **Bancos de dados geográficos**. São José dos Campos: Mundogeo, 2005. v. 1, p. 11-52.
- CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G.; OLIVEIRA, C. G. Acurácia posicional de MDE ASTER/TERRA em área montanhosa. **Geomática** (Santa Maria), v. 4, n. 1, p. 12-23, 2009.
- CAVALLI, A. C.; VALERIANO, M. M. Suavização da declividade em função da resolução da imagem em sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 295-298, 2000.
- CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUEDOIS, S.; SILVEIRA, N.; PHACHOMPHON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, p. 126–141, 2006.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1980. 188 p.
- COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; LUCENA, A. M. P.; CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 222-230, 2010.
- CRESSIE, N. The origins of Kriging. **Mathematical Geology**, v. 22, n. 3, p. 239-252, 1990.
- DATTA, P. S.; KIRCHNER, H. S. Erosion relevant topographical parameters derived from different DEMs - A comparative study from the Indian Lesser Himalayas. **Remote Sensing**, v.2, p. 1941-1961, 2010.
- DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 81 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.
- DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 427-433, 1996a.
- DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 10, n. 3, p. 311-331, 1996b.

DIAS, N. W.; DINIZ, H. N.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T. Geospatial technology applied to the identification of groundwater recharge areas in northeastern São Paulo, Brazil. **Ambiente e Água**, v. 4, n. 2, p. 21-30, 2009.

DOYLE, F. J. Digital Terrain Models: An overview. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 44, p. 1481-1485. 1978.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Andes**: guide to GIS and Image processing. 15. Worcester: Clark University, 2006. 328 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS**. 9.3. Redlands: ESRI Inc, 2008.

ERSKINE, R. H.; GREEN, T. R.; RAMIREZ, J. A.; MACDONALD, L. H. Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. **Water Resources Research**, v. 42, p. 1-9, 2006.

FERNÁNDEZ, G. Á. V. **Análise da erosão do solo usando a EUPS, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1996. 163 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1996.

FERNANDES, M. C.; MENEZES, P. M. L. Comparação entre métodos para geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real no maciço da Tijuca-RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57, v. 2, p. 154-161, 2005.

FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 4, p. 467-489, 2006.

FOSTER, G. R.; WISCHMEIER, W. H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. **American Society of Agricultural Engineers Transactions**, v. 17, p. 305-309, 1974.

FREEMAN, G. T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 2, p. 413-422, 1991.

GAMEIRO, M. G. **Avaliação de métodos para obtenção dos fatores "L" e "S" da EUPS numa microbacia, via geoprocessamento e banco de dados**. 1997. 138 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1997.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erorivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Ed.). **Erosão e conservação do solo**: conceitos, temas e aplicações. 4. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p. 17-50.

GLOBAL MAPPER SOFTWARE. **Global mapper**. 9.03. Parker: Global Mapper Software LLC, 2008.

GOLDEN SOFTWARE. **Surface mapping system**. 9.1.352 . Golden: Golden Software, Inc. 2009.

HENGL, T.; REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009. 765p.

HIGA, L. T.; FILHO, A. C. P.; TORRES, T. G.; SALLES, A. T. Avaliação da precisão vertical do modelo SRTM para a bacia do rio Paraguai, no Estado de Mato Grosso do Sul. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 1., 2006, Campo Grande. **Anais...** São José dos Campos: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2006, p.834-840.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, p. 211-232, 1989.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO (IGC). **Mapa índice dos projetos de mapeamento 1:10.000**. Divisão Municipal do estado de São Paulo. São Paulo, 1998. Escala 1:1.000.000.

KING, C.; BAGHDADI, N.; LECOMTE, V.; CERDAN, O. The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. **Catena**, v. 62, p. 79-93, 2005.

KINNELL, P. I. A.; RISSE L. M. USLE-M : Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 6, p. 1667-1672, 1998.

KINNELL, P. I. A. Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. **Soil Science Society of America journal**, v. 69, p. 674–680, 2005.

KIRKBY, M. J.; CHORLEY, R. J. Throughflow, overland flow and erosion. **Hydrological Sciences Journal**, v. 12, n. 3, p. 5–21, 1967.

LAFLÉN, J. M.; MOLDENHAUER, W. C. **Pioneering soil erosion prediction: the USLE story**. Thailand: World Association of Soil and Water Conservation, 2003. 54 p.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. New York: CRC Press, 2005. 323 p.

LOPES, F.; MERTEN, G. H.; FRANZEN, M.; GIASSEN, H.; HELFER, F.; CYBIS, L. F. A. Utilização de P-Index em uma bacia hidrográfica através de técnicas de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 312–317, 2007.

LOWDERMILK, W. C. Conquest of the land through seven thousand years. **Soil Conservation Service Agriculture Inform Bulletin**, v. 99, p. 1-30, 1953.

MAFRA, N. M. C. Erosão e planificação de uso do solo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação do solo**: conceitos, temas e aplicações. 4. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p. 301-320.

MAUNE, D. F. **Digital Elevation Model technologies and applications**: the DEM user manual. Bethesda: ASPRS, 2007, 655p.

MC COOL, D.K.; BROWN, L.C.; FOSTER, G.R.; MUTCHLER, C.K.; MEYER, L.D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 30, p. 1387-1396, 1987.

MC COOL, D.K.; FOSTER, G.R.; MUTCHLER, C.K.; MEYER, L.D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 32, p. 1571-1576, 1989.

MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 2, 2009.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, p. 761–799, 2003.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The digital terrain model: theory and application, **Photogrammetric Engineering**, v.24, n.3, p.433, 1958.

MONTGOMERY, D. R. Is agriculture eroding civilization's foundation?. **Geological Society of America Today**, v. 17, n. 10, 2007.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. **Soil Science Society of America journal**, v. 50, n. 5, p. 1294-1298, 1986.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J.; MACKENZIE, D. H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 31, n. 4, p. 1098-1107, 1988.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991.

MOORE, I. D.; WILSON, J. P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 47, n. 5, p. 423-428, 1992.

NAMIKAWA, L. M. **Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características**. 1995. 136 p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Missions**. Yvette Smith. United States: NASA. 2011. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/missions>>. Acesso em 15 jan. 2011.

NEARING, M.A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 3, p. 917-919, 1997.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, p. 323 – 344, 1984.

OLIVER, M. A., WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 4, n. 3, p. 313–332, 1990.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: IAC, 1999. 108 p. (Boletim Científico n. 45)

OLIVEIRA, C. G. **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais ópticos (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM)**: um estudo para a região da Serra dos Carajás (PA). 2005. 184 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SOBRINHO, T. A.; PANACHUKI, E. Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. **Ambiente e Água**, v. 5, n. 2, p. 217-225, 2010.

OLSON, G. W. Archaeology: lessons on future soil use. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 5, p. 261–264, 1981.

OOST, K. V.; GOVERS, G.; DESMET, P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. **Landscape Ecology**, v. 15, p. 577-589, 2000.

OWENS, P. N.; BATALLA, R. J.; COLLINS, A. J.; GOMEZ, B.; HICKS, D. M.; HOROWITZ, A. J.; KONDOLF, G. M.; MARDEN, M.; PAGE, M. J.; PEACOCK, D. H.; PETTICREW, E. L.; SALOMONS, W.; TRUSTRUM, N. A. Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. **River Research And Applications**, v. 21, p. 693–717, 2005.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S. SHPRITZ, L. FITTON, L. SAFFOURI, R. BLAIR, R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v. 267, p. 1117-1122, 1995.

POLYAKOV, V.; LAI, R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. **Environment International**, v. 30, p. 547-556, 2004.

POST, W. M.; IZAURRALDE, R. C.; MANN, L. K.; BLISS, N. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. **Climatic Change**, v. 51, p. 73-99, 2001.

QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 59-79, 1991.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, p. 241– 262, 2003.

RENARD, K.G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water**: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. Washington: USDA, 1997. 384p. (Agriculture Handbook n. 703)

RODRIGUES, M. T. The conservation of brazilian reptiles: challenges for a megadiverse country. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 659-664, 2005.

RODRÍGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, R. F. Avaliação da adequação dos produtos ASTER GDEM no auxílio ao mapeamento sistemático brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2010.

RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.

SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p. 4473-4480.

SCHLESINGER, W. H.; REYNOLDS, J. F.; CUNNINGHAM, G. L.; HUENNEKE, L. F.; JARRELL, W. M.; VIRGINIA, R. A.; WHITFORD, W. G. Biological feedbacks in global desertification. **Science**, v. 247, p. 1043–1048, 1990.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balances hídricos climatológicos do Brasil** - 500 balances hídricos de localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ, 1999. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/nurma.html>>. Acesso em: 05/02/2010.

SETZER, J. **Atlas climatológico do Estado de São Paulo**. Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Paraguai. São Paulo: CESP, 40p. 1966.

SLATER, J. A.; GARVEY, G.; JOHNSTON, C.; HAASE, J.; HEADY, B.; KROENUNG, G.; LITTLE, J. The SRTM Data “Finishing” Process and Products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 237–247, 2006.

SMITH, D. D. Interpretation of soil conservation data for field use. **Agricultural Engineering**, v. 22, n. 5, p. 173-175, 1941.

STARR, G. C.; LAI, R.; MALONE, R.; HOTHEM, D.; OWENS, L.; KIMBLE, J. Modeling soil carbon transported by water erosion processes. **Land Degradation & Development**, v. 11, p. 83-91, 2000.

STATSOFT. **Statistica**. 7.0. Tulsa: StatSoft Inc. 2004.

TARGA, M. S. **Estudo hidrológico da Bacia do Rio Una**: Subsídios para estabelecimento de planos de macrodrenagem no Vale do Paraíba do Sul - SP. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Universidade de Taubaté. Taubaté, SP. p. 1-14. 2009.

TOUTIN, T.; GRAY, A. L. State-of-the-art of extraction of elevation data using satellite SAR data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000.

VALERIANO, M. M. **Estimativa de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos**. 1999. 140 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

VALERIANO, M. M. Mapeamento do comprimento de rampa em microbacias com Sistema de Informação Geográfica. **Acta Scientiarum Maringá**, v. 24, n. 5, p. 1541-1551, 2002a

VALERIANO, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos: INPE, 2002b. 54 p.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES JR., J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1169–1181, 2006.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **TOPODATA**: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA**: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 74 p.

VERSTRAETEN, G. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. **Geomorphology**, v. 81, p. 128-140, 2006.

VRIELING, A. Satellite remote sensing for water assessment: a review. **Catena**, v. 65, p. 2-18, 2006.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p.1930–1946, 2002.

WILLIAMS, J. R. **Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. Washington: USDA, 1975. p. 244-252. (ARS-S-40).

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain analysis**: principles and applications. New York: Wiley, 2000. 479 p.

WISE, S.M. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. **Hydrological Processes**, v.14, p.1909-1929, 2000.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**: guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington: USDA, 1965. 47p. (Agriculture Handbook n. 282)

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook n. 537)

ZEVENBERGE, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes Landforms**, v. 12, p. 47-56, 1987.

ZINGG, A. W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. **Agricultural Engineering**, v.21, p.59-64, 1940.

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

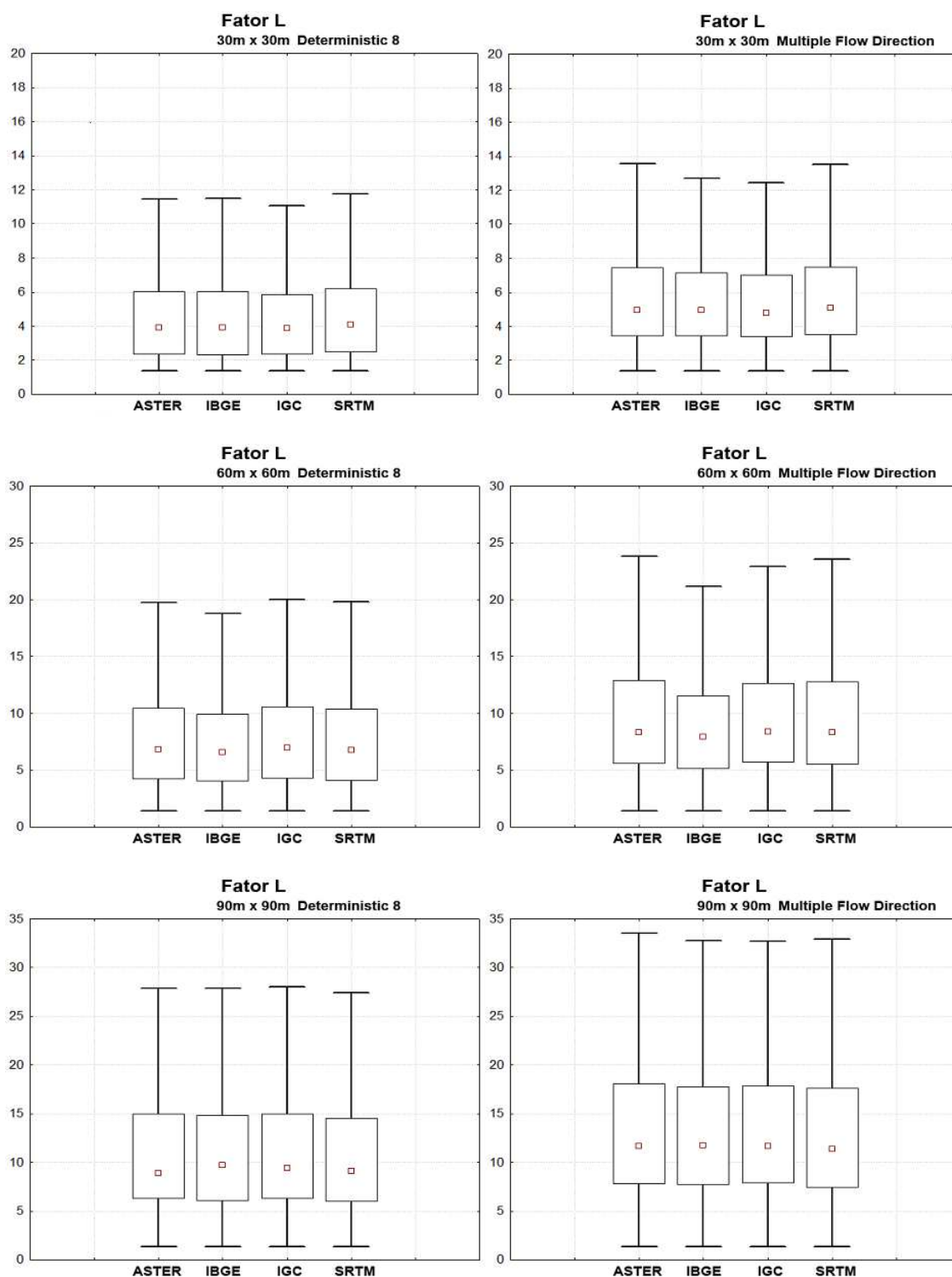


Figura A.1 – Gráfico de caixas da distribuição de valores do fator L obtido a partir de diferentes MDE utilizando diferentes algoritmos de distribuição do fluxo e espaçamentos de grade.

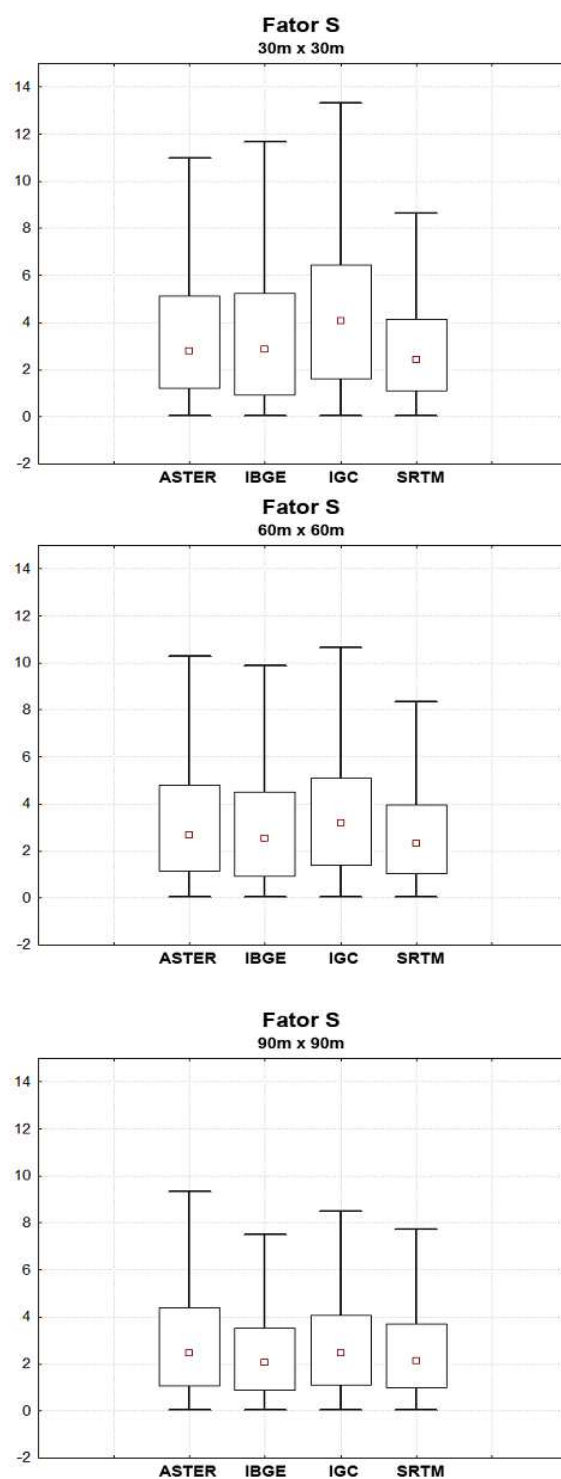


Figura A.2 – Gráfico de caixas da distribuição de valores do fator S obtido a partir de diferentes MDE utilizando diferentes espaçamentos de grade.

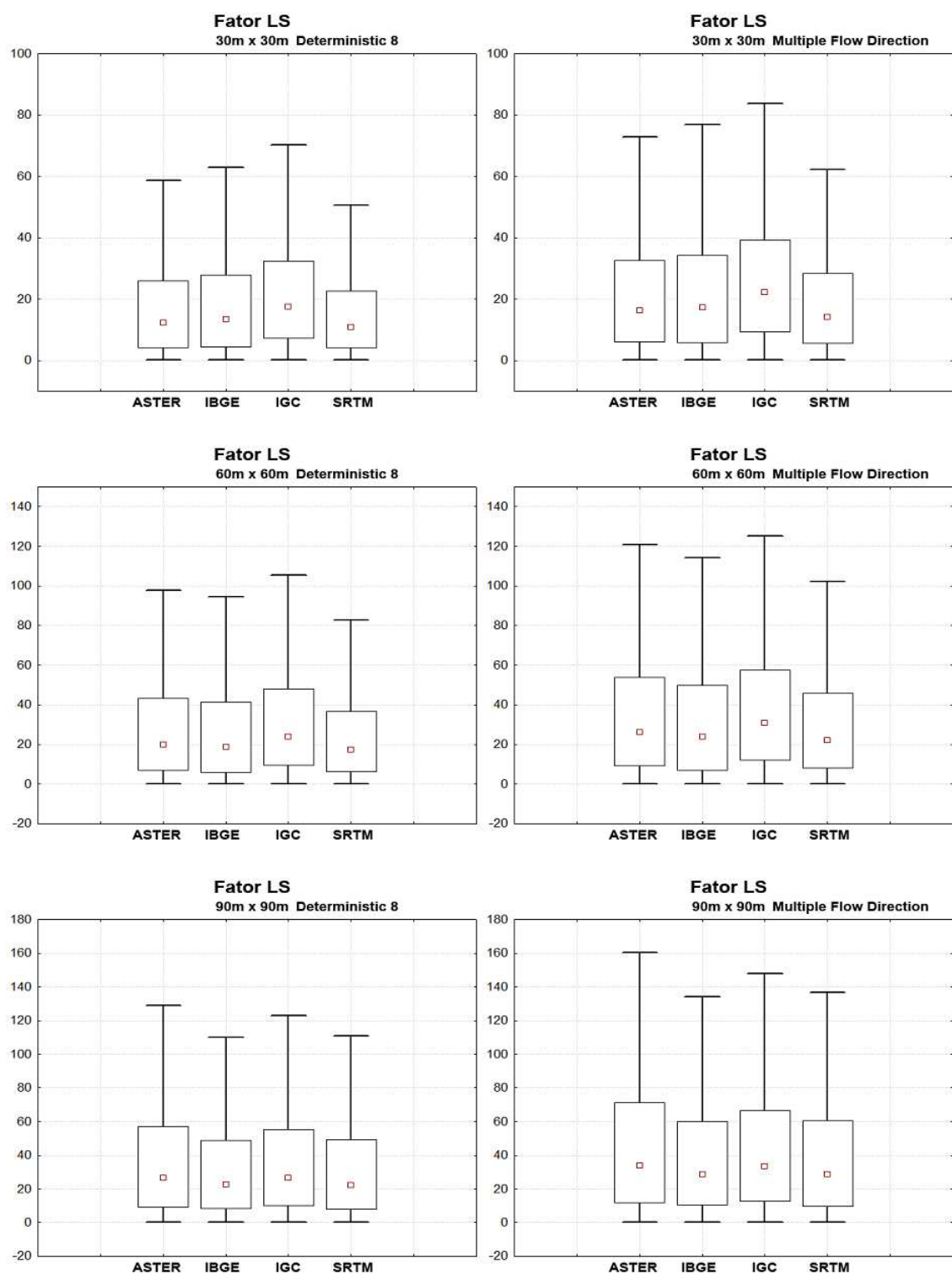


Figura A.3 – Gráfico de caixas da distribuição de valores do fator LS obtido a partir de diferentes MDE utilizando diferentes algoritmos de distribuição do fluxo e espaçamentos de grade.

Tabela A.1 – Estatística descritiva das grades do fator 'L' D8 30m x 30m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	6.249	6.548	5.874	6.658
Desvio Padrão	11.744	13.286	10.456	14.579

Tabela A.2 – Estatística descritiva das grades do fator 'L' MFD 30m x 30m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	8.127	8.681	7.204	8.166
Desvio Padrão	14.030	16.010	11.091	16.326

Tabela A.3 – Estatística descritiva das grades do fator 'S' 30m x 30m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	2.996	3.573	3.554	4.437
Desvio Padrão	2.150	2.602	2.740	2.844

Tabela A.4 – Estatística descritiva das grades do fator 'LS' D8 30m x 30m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	18.794	21.664	21.515	26.017
Desvio Padrão	31.543	37.029	36.253	40.782

Tabela A.5 – Estatística descritiva das grades do fator 'LS' MFD 30m x 30m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	23.365	27.229	25.961	31.469
Desvio Padrão	34.802	43.033	39.370	46.608

Tabela A.6 – Estatística descritiva das grades do fator 'L' D8 60m x 60m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	10.820	11.560	8.652	11.751
Desvio Padrão	17.821	20.176	9.522	20.842

Tabela A.7 – Estatística descritiva das grades do fator 'L' MFD 60m x 60m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	13.880	15.053	9.959	14.130
Desvio Padrão	21.762	24.808	9.263	23.091

Tabela A.8 – Estatística descritiva das grades do fator 'S' 60m x 60m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	2.873	3.372	3.120	3.593
Desvio Padrão	2.080	2.462	2.321	2.362

Tabela A.9 – Estatística descritiva das grades do fator 'LS' D8 60m x 60m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	31.036	36.022	31.566	38.761
Desvio Padrão	46.736	54.294	42.074	53.820

Tabela A.10 – Estatística descritiva das grades do fator 'LS' MFD 60m x 60m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	38.704	45.311	36.684	46.564
Desvio Padrão	54.772	66.642	43.017	61.187

Tabela A.11 – Estatística descritiva das grades do fator 'L' D8 90m x 90m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	15.391	16.284	14.405	16.255
Desvio Padrão	23.312	25.284	20.486	25.493

Tabela A.12 – Estatística descritiva das grades do fator 'L' MFD 90m x 90m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	19.061	20.134	17.548	19.417
Desvio Padrão	27.203	29.101	23.403	28.158

Tabela A.13 – Estatística descritiva das grades do fator 'S' 90m x 90m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	2.701	3.102	2.538	2.924
Desvio Padrão	1.982	2.275	1.884	2.021

Tabela A.14 – Estatística descritiva das grades do fator 'LS' D8 90m x 90m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	41.807	48.166	38.990	46.126
Desvio Padrão	58.909	67.808	53.459	62.475

Tabela A.15 – Estatística descritiva das grades do fator 'LS' MFD 90m x 90m

	SRTM	GDEM	IBGE	IGC
Média	51.461	59.132	46.902	55.276
Desvio Padrão	70.056	81.263	60.140	70.844

APÊNDICE B – ANÁLISE DE REGRESSÃO

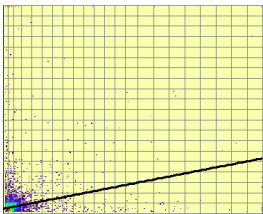
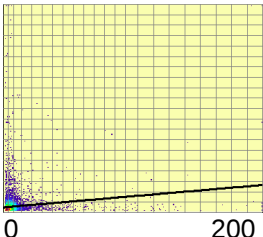
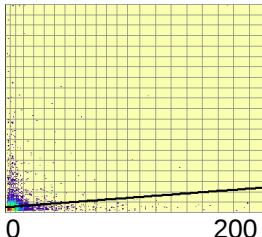
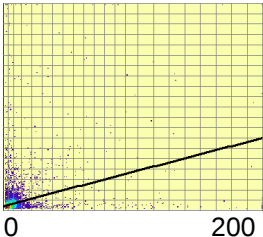
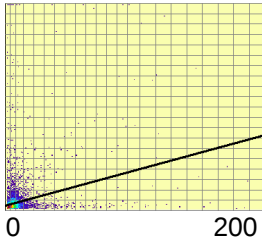
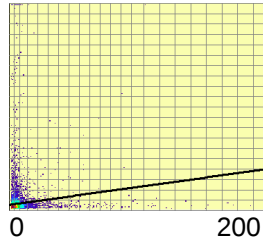
ASTER GDEM	$y = 4,63 + 0,24x$ $r = 0,272710$ $R^2 = 7,44\%$	$y = 5,06 + 0,11x$ $r = 0,141633$ $R^2 = 2,01\%$	$y = 4,42 + 0,32x$ $r = 0,305947$ $R^2 = 9,36\%$
200  0 200	SRTM	$y = 5,18 + 0,09x$ $r = 0,111273$ $R^2 = 1,24\%$	$y = 4,47 + 0,34x$ $r = 0,282107$ $R^2 = 7,96\%$
200  0 200	200  0 200	IBGE 1:50.000	$y = 5,60 + 0,17x$ $r = 0,122505$ $R^2 = 1,5\%$
200  0 200	200  0 200	200  0 200	IGC 1:10.000

Figura B.1 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator L calculado com base nos MDE de 30x30 utilizando o algoritmo Deterministic 8.

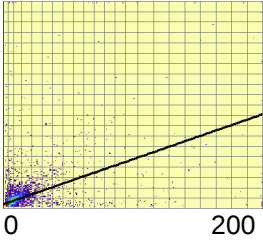
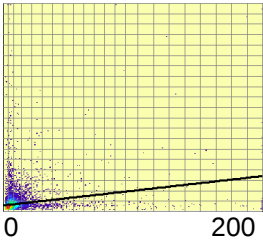
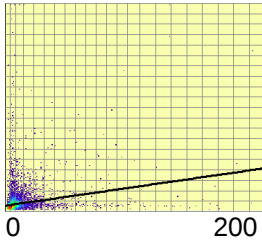
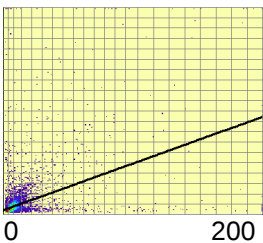
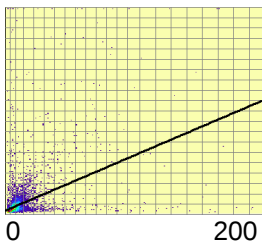
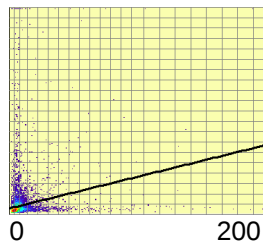
ASTER GDEM	$y = 4,24 + 0,43x$ $r = 0,496903$ $R^2 = 24,69\%$	$y = 5,94 + 0,14x$ $r = 0,201779$ $R^2 = 4,07\%$	$y = 4,27 + 0,45x$ $r = 0,445322$ $R^2 = 19,83\%$
200 	SRTM	$y = 5,72 + 0,17x$ $r = 0,224480$ $R^2 = 5,04\%$	$y = 3,88 + 0,53x$ $r = 0,461852$ $R^2 = 21,33\%$
200 	200 	IBGE 1:50.000	$y = 5,95 + 0,31x$ $r = 0,213702$ $R^2 = 4,57\%$
200 	200 	200 	IGC 1:10.000

Figura B.2 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator L calculado com base nos MDE de 30x30 utilizando o algoritmo Multiple Flow Direction.

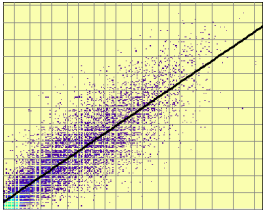
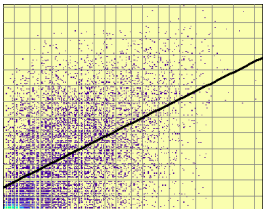
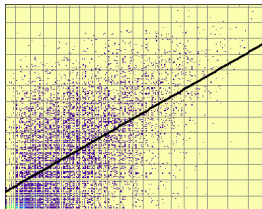
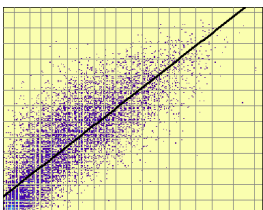
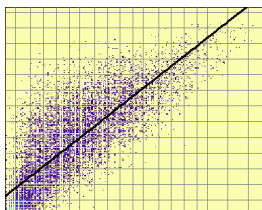
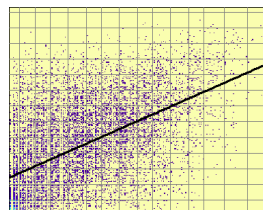
ASTER GDEM	$y = 0,44 + 0,71x$ $r = 0,860642$ $R^2 = 74,07\%$	$y = 1,54 + 0,56x$ $r = 0,535026$ $R^2 = 28,60\%$	$y = 1,23 + 0,89x$ $r = 0,820282$ $R^2 = 67,29\%$
15  0 15	SRTM	$y = 1,25 + 0,77x$ $r = 0,603791$ $R^2 = 36,46\%$	$y = 1,23 + 1,06x$ $r = 0,808992$ $R^2 = 65,45\%$
15  0 15	15  0 15	IBGE 1:50.000	$y = 2,43 + 0,55x$ $r = 0,540439$ $R^2 = 29,21\%$
15  0 15	15  0 15	15  0 15	IGC 1:10.000

Figura B.3 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator S calculado com base nos MDE de 30x30.

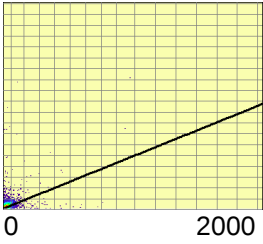
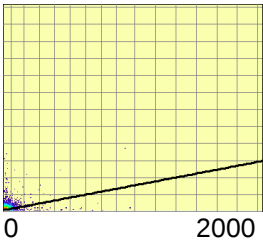
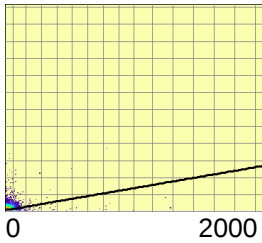
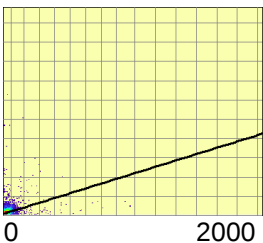
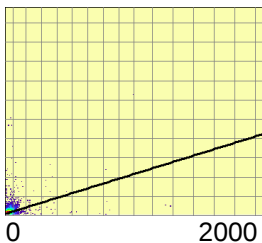
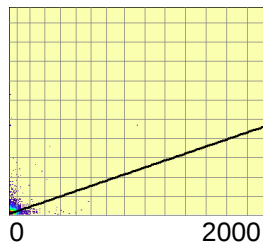
ASTER GDEM	$y = 9,31 + 0,43x$ $r = 0,461878$ $R^2 = 21,33\%$	$y = 15,48 + 0,26x$ $r = 0,289988$ $R^2 = 8,41\%$	$y = 17,44 + 0,37x$ $r = 0,358092$ $R^2 = 12,82\%$
2000 	SRTM	$y = 16,03 + 0,27x$ $r = 0,286909$ $R^2 = 8,23\%$	$y = 17,45 + 0,43x$ $r = 0,391841$ $R^2 = 15,35\%$
2000 	2000 	IBGE 1:50.000	$y = 17,64 + 0,37x$ $r = 0,324869$ $R^2 = 10,55\%$
2000 	2000 	2000 	IGC 1:10.000

Figura B.4 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator LS calculado com base nos MDE de 30x30 utilizando o algoritmo Deterministic 8

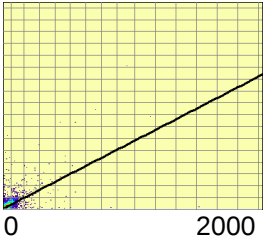
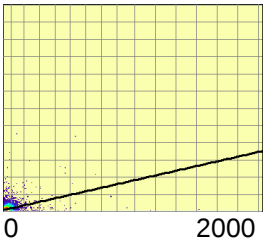
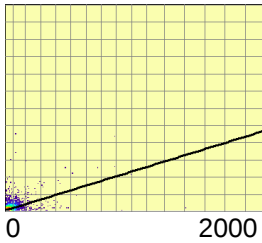
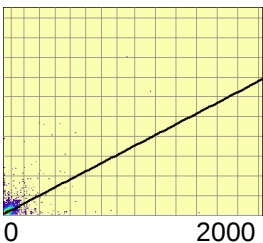
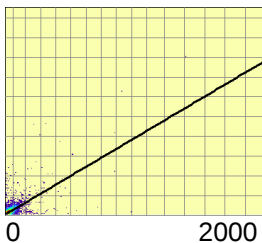
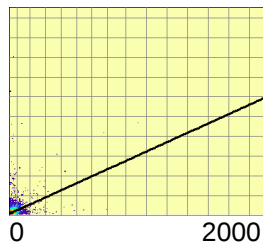
ASTER GDEM	$y = 8,53 + 0,53x$ $r = 0,650714$ $R^2 = 42,34\%$	$y = 17,04 + 0,32x$ $r = 0,373673$ $R^2 = 13,96\%$	$y = 13,69 + 0,64x$ $r = 0,597769$ $R^2 = 35,73\%$
2000 	SRTM	$y = 13,65 + 0,53x$ $r = 0,500670$ $R^2 = 25,07\%$	$y = 10,77 + 0,88x$ $r = 0,674970$ $R^2 = 45,56\%$
2000 	2000 	IBGE 1:50.000	$y = 18,46 + 0,49x$ $r = 0,397781$ $R^2 = 15,82\%$
2000 	2000 	2000 	IGC 1:10.000

Figura B.5 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator LS calculado com base nos MDE de 30x30 utilizando o algoritmo Multiple Flow Direction.

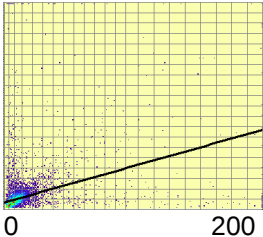
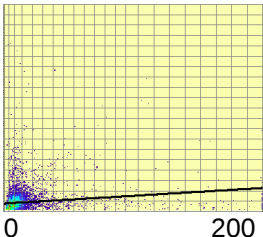
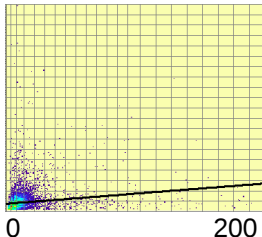
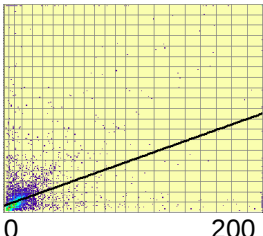
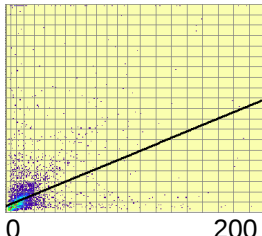
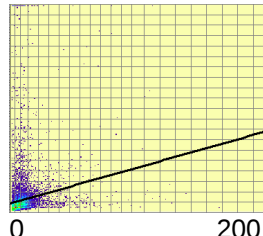
ASTER GDEM	$y = 6,85 + 0,35x$ $r = 0,397560$ $R^2 = 15,81\%$	$y = 7,78 + 0,07x$ $r = 0,155235$ $R^2 = 2,41\%$	$y = 6,61 + 0,44x$ $r = 0,433410$ $R^2 = 18,78\%$
200  0 200	SRTM	$y = 7,58 + 0,09x$ $r = 0,178112$ $R^2 = 3,17\%$	$y = 6,12 + 0,51x$ $r = 0,442391$ $R^2 = 19,57\%$
200  0 200	200  0 200	IBGE 1:50.000	$y = 8,67 + 0,35x$ $r = 0,165726$ $R^2 = 2,75\%$
200  0 200	200  0 200	200  0 200	IGC 1:10.000

Figura B.6 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator L calculado com base nos MDE de 60x60 utilizando o algoritmo Deterministic 8.

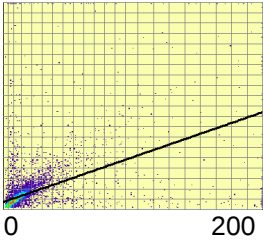
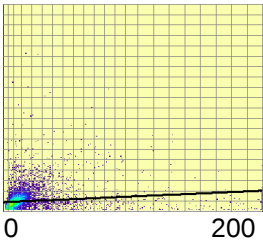
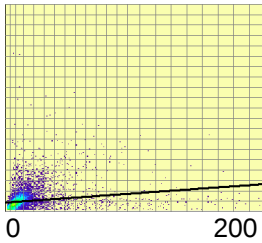
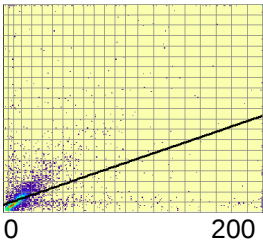
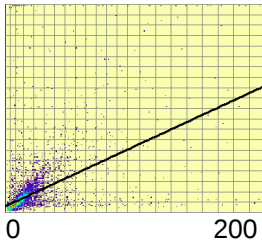
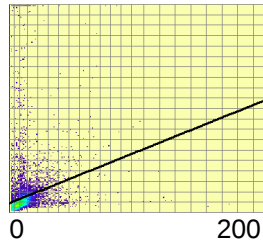
ASTER GDEM	$y = 7,29 + 0,43x$ $r = 0,505347$ $R^2 = 25,54\%$	$y = 9,11 + 0,05x$ $r = 0,151096$ $R^2 = 2,28\%$	$y = 7,57 + 0,42x$ $r = 0,469261$ $R^2 = 22,02\%$
200 	SRTM	$y = 8,71 + 0,08x$ $r = 0,208577$ $R^2 = 4,35\%$	$y = 6,03 + 0,57x$ $r = 0,545157$ $R^2 = 29,72\%$
200 	200 	IBGE 1:50.000	$y = 9,06 + 0,5x$ $r = 0,202382$ $R^2 = 4,10\%$
200 	200 	200 	IGC 1:10.000

Figura B.7 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator L calculado com base nos MDE de 60x60 utilizando o algoritmo Multiple Flow Direction.

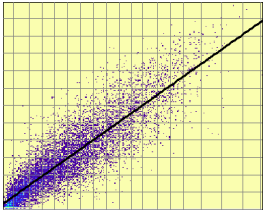
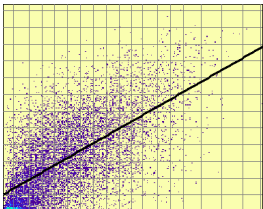
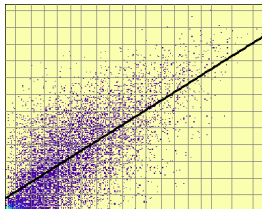
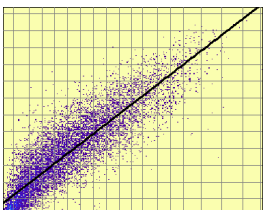
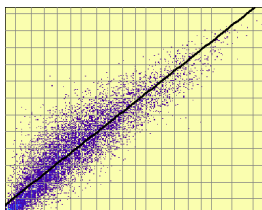
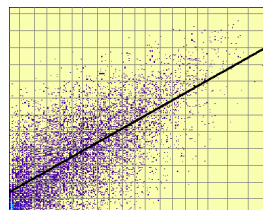
ASTER GDEM	$y = 0,34 + 0,74x$ $r = 0,884907$ $R^2 = 78,31\%$	$y = 1,02 + 0,62x$ $r = 0,659228$ $R^2 = 43,46\%$	$y = 0,74 + 0,84x$ $r = 0,884138$ $R^2 = 78,17\%$
15  0 15	SRTM	$y = 0,79 + 0,81x$ $r = 0,724884$ $R^2 = 52,55\%$	$y = 0,65 + 1,02x$ $r = 0,906701$ $R^2 = 82,21\%$
15  0 15	15  0 15	IBGE 1:50.000	$y = 1,37 + 0,7x$ $r = 0,70252$ $R^2 = 49,35\%$
15  0 15	15  0 15	15  0 15	IGC 1:10.000

Figura B.8 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator S calculado com base nos MDE de 60x60.

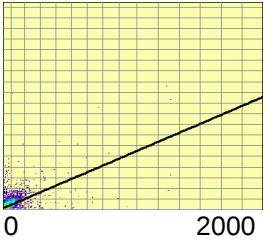
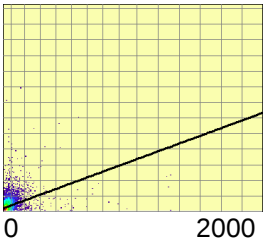
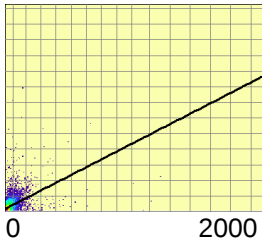
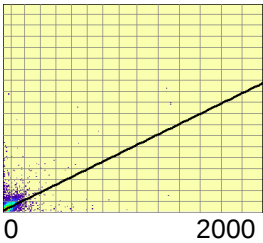
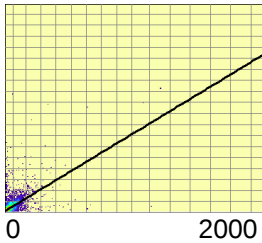
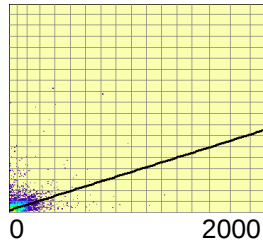
ASTER GDEM	$y = 13,56 + 0,47x$ $r = 0,613974$ $R^2 = 37,7\%$	$y = 21,36 + 0,28x$ $r = 0,388420$ $R^2 = 15,09\%$	$y = 19,34 + 0,53x$ $r = 0,571858$ $R^2 = 32,70\%$
2000 	SRTM	$y = 17,94 + 0,43x$ $r = 0,473972$ $R^2 = 22,46\%$	$y = 15,91 + 0,73x$ $r = 0,615308$ $R^2 = 37,86\%$
2000 	2000 	IBGE 1:50.000	$y = 20,94 + 0,55x$ $r = 0,433831$ $R^2 = 18,82\%$
2000 	2000 	2000 	IGC 1:10.000

Figura B.9 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator LS calculado com base nos MDE de 60x60 utilizando o algoritmo Dterministic 8.

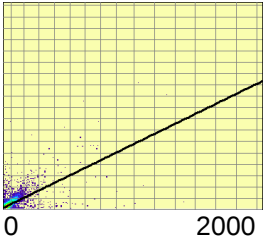
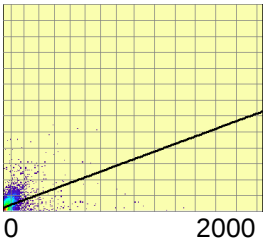
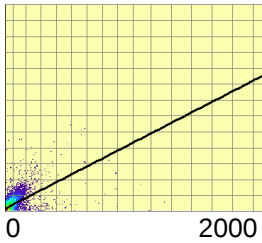
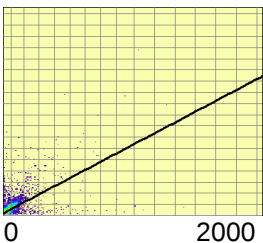
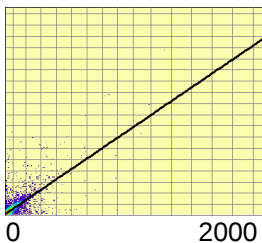
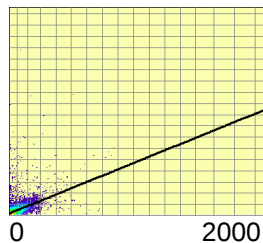
ASTER GDEM	$y = 15,22 + 0,5x$ $r = 0,662426$ $R^2 = 43,88\%$	$y = 24,34 + 0,27x$ $r = 0,437186$ $R^2 = 19,11\%$	$y = 21,22 + 0,54x$ $r = 0,609603$ $R^2 = 37,16\%$
2000 	SRTM	$y = 19,2 + 0,45x$ $r = 0,561371$ $R^2 = 31,51\%$	$y = 13,45 + 0,86x$ $r = 0,724784$ $R^2 = 52,53\%$
2000 	2000 	IBGE 1:50.000	$y = 19,85 + 0,70x$ $r = 0,496938$ $R^2 = 24,69\%$
2000 	2000 	2000 	IGC 1:10.000

Figura B.10 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator LS calculado com base nos MDE de 60x60 utilizando o algoritmo Multiple Flow Direction.

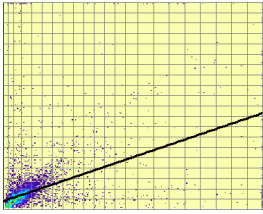
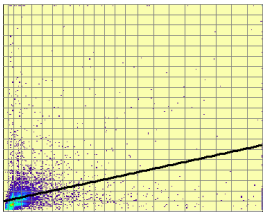
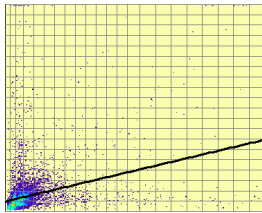
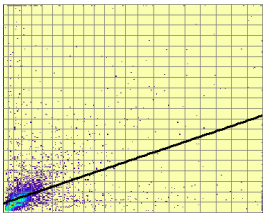
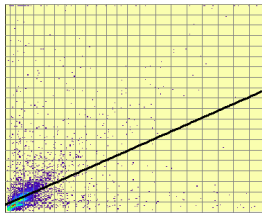
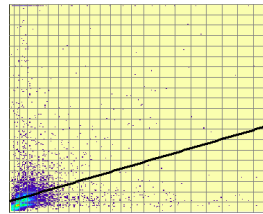
ASTER GDEM	$y = 8,17 + 0,42x$ $r = 0,482391$ $R^2 = 23,27\%$	$y = 9,87 + 0,27x$ $r = 0,346597$ $R^2 = 12,01\%$	$y = 8,94 + 0,42x$ $r = 0,444419$ $R^2 = 19,75\%$
200  0 200	SRTM	$y = 9,83 + 0,29x$ $r = 0,333794$ $R^2 = 11,14\%$	$y = 7,54 + 0,55x$ $r = 0,51046$ $R^2 = 26,06\%$
200  0 200	200  0 200	IBGE 1:50.000	$y = 10,65 + 0,36x$ $r = 0,301929$ $R^2 = 9,12\%$
200  0 200	200  0 200	200  0 200	IGC 1:10.000

Figura B.11 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator L calculado com base nos MDE de 90x90 utilizando o algoritmo Deterministic 8.

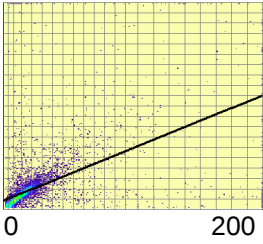
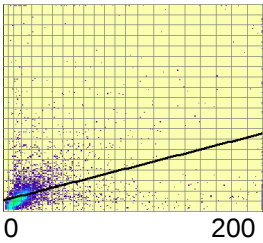
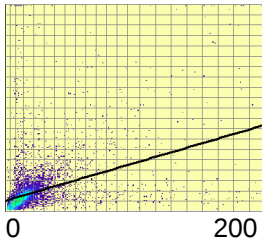
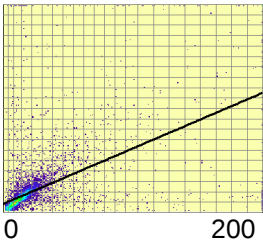
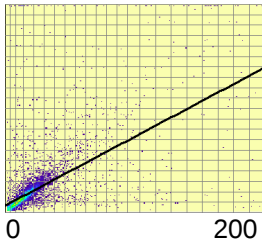
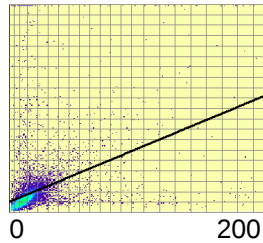
ASTER GDEM	$y = 8,55 + 0,51x$ $r = 0,559665$ $R^2 = 31,32\%$	$y = 10,78 + 0,32x$ $r = 0,421996$ $R^2 = 17,81\%$	$y = 8,41 + 0,53x$ $r = 0,571915$ $R^2 = 32,71\%$
200  0 200	SRTM	$y = 10,43 + 0,36x$ $r = 0,433212$ $R^2 = 18,77\%$	$y = 6,71 + 0,66x$ $r = 0,645182$ $R^2 = 41,63\%$
200  0 200	200  0 200	IBGE 1:50.000	$y = 10,21 + 0,51x$ $r = 0,425593$ $R^2 = 18,11\%$
200  0 200	200  0 200	200  0 200	IGC 1:10.000

Figura B.12 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator L calculado com base nos MDE de 90x90 utilizando o algoritmo Multiple Flow Direction.

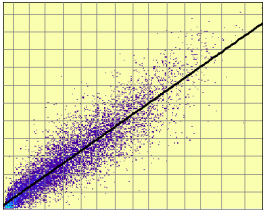
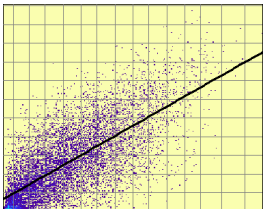
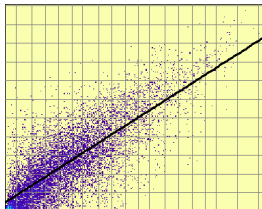
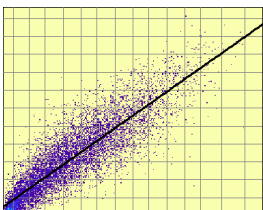
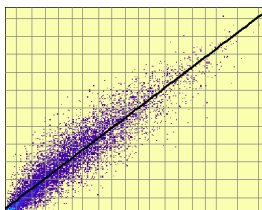
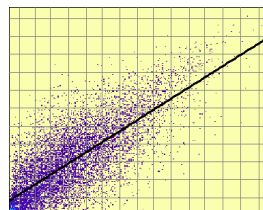
ASTER GDEM	$y = 0,24 + 0,78x$ $r = 0,907975$ $R^2 = 82,44\%$	$y = 0,66 + 0,60x$ $r = 0,731222$ $R^2 = 53,47\%$	$y = 0,49 + 0,78x$ $r = 0,887251$ $R^2 = 78,72\%$
15  0 15	SRTM	$y = 0,49 + 0,75x$ $r = 0,795098$ $R^2 = 63,22\%$	$y = 0,39 + 0,93x$ $r = 0,923724$ $R^2 = 85,33\%$
15  0 15	15  0 15	IBGE 1:50.000	$y = 0,83 + 0,82x$ $r = 0,772207$ $R^2 = 59,63\%$
15  0 15	15  0 15	15  0 15	IGC 1:10.000

Figura B.13 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator S calculado com base nos MDE de 90x90.

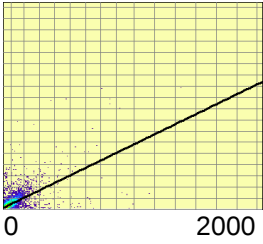
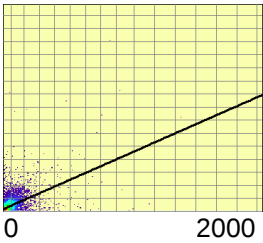
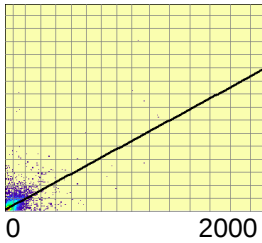
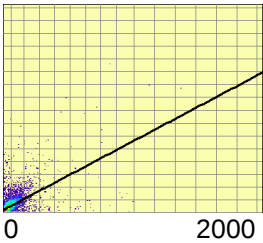
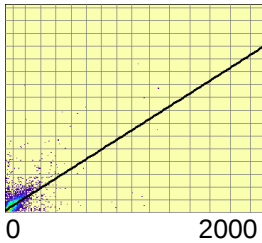
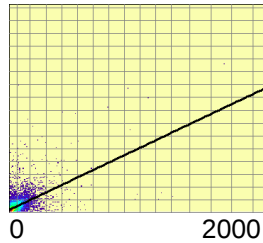
ASTER GDEM	$y = 15,4 + 0,52x$ $r = 0,641893$ $R^2 = 41,2\%$	$y = 19,13 + 0,41x$ $r = 0,530101$ $R^2 = 28,10\%$	$y = 20,52 + 0,5x$ $r = 0,594343$ $R^2 = 35,32\%$
2000 	SRTM	$y = 15,11 + 0,58x$ $r = 0,620058$ $R^2 = 38,45\%$	$y = 16,47 + 0,69x$ $r = 0,673978$ $R^2 = 45,42\%$
2000 	2000 	IBGE 1:50.000	$y = 21,3 + 0,6x$ $r = 0,554036$ $R^2 = 30,7\%$
2000 	2000 	2000 	IGC 1:10.000

Figura B.14 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator LS calculado com base nos MDE de 90x90 utilizando o algoritmo Deterministic 8.

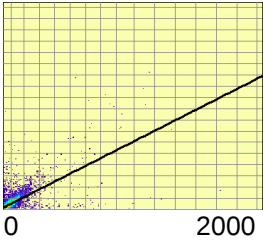
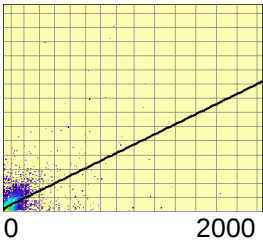
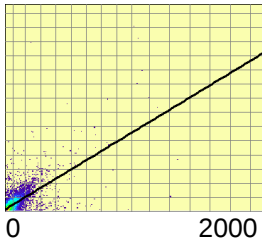
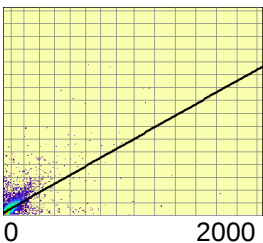
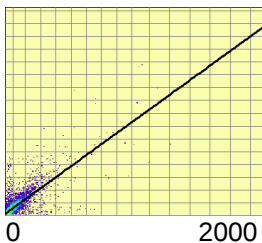
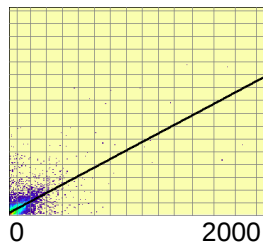
ASTER GDEM	$y = 17,84 + 0,55x$ $r = 0,679065$ $R^2 = 46,11\%$	$y = 21,79 + 0,42x$ $r = 0,579912$ $R^2 = 33,63\%$	$y = 22,75 + 0,53x$ $r = 0,652643$ $R^2 = 42,59\%$
2000 	SRTM	$y = 16,47 + 0,61x$ $r = 0,669909$ $R^2 = 44,88\%$	$y = 14,51 + 0,79x$ $r = 0,782275$ $R^2 = 61,21\%$
2000 	2000 	IBGE 1:50.000	$y = 19,91 + 0,74x$ $r = 0,654390$ $R^2 = 42,82\%$
2000 	2000 	2000 	IGC 1:10.000

Figura B.15 – Análise de regressão e diagramas de dispersão do Fator LS calculado com base nos MDE de 90x90 utilizando o algoritmo Multiple Flow Direction.

APÊNDICE C – ANÁLISE DO RESÍDUO PADRONIZADO

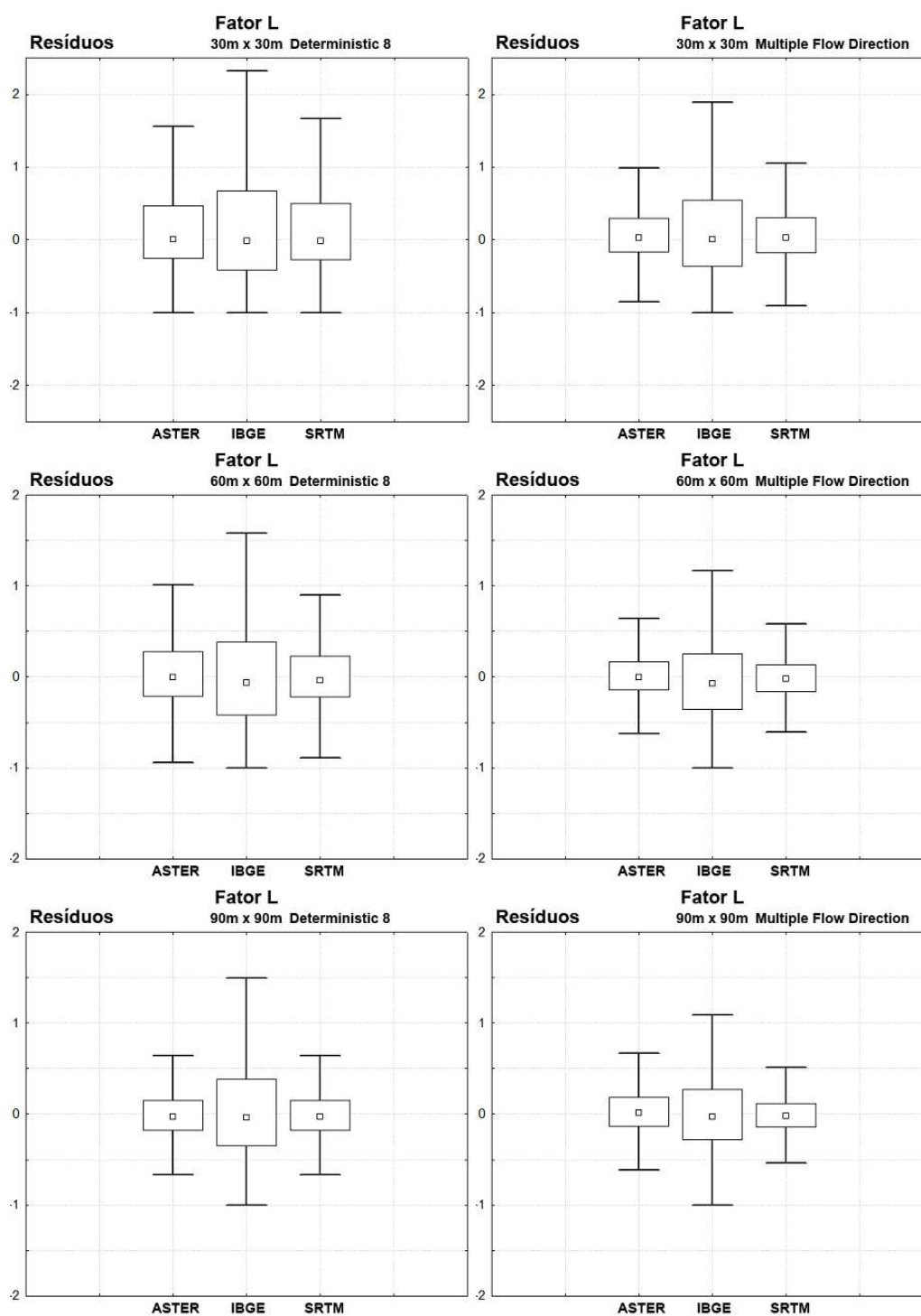


Figura C.1 – Distribuição de valores do resíduo padronizado do fator 'L' utilizando diferentes algoritmos de distribuição do fluxo e espaçamentos de grade

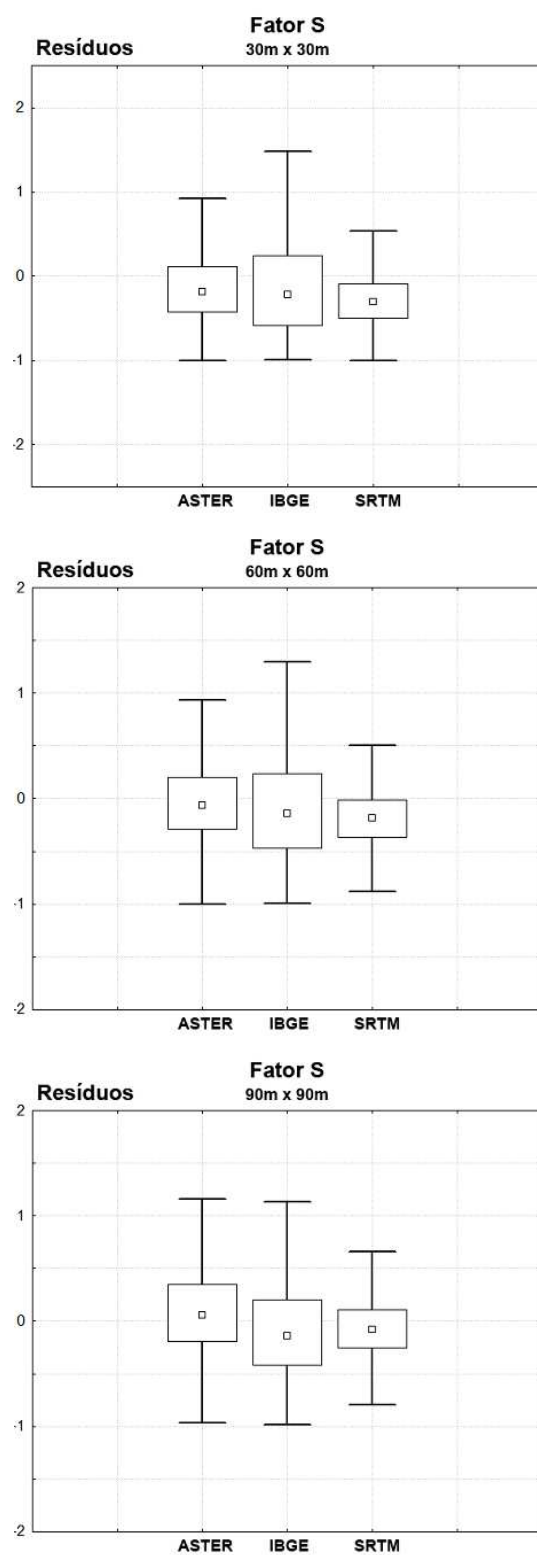


Figura C.2 – Distribuição de valores do resíduo padronizado do fator 'S' utilizando diferentes espaçamentos de grade

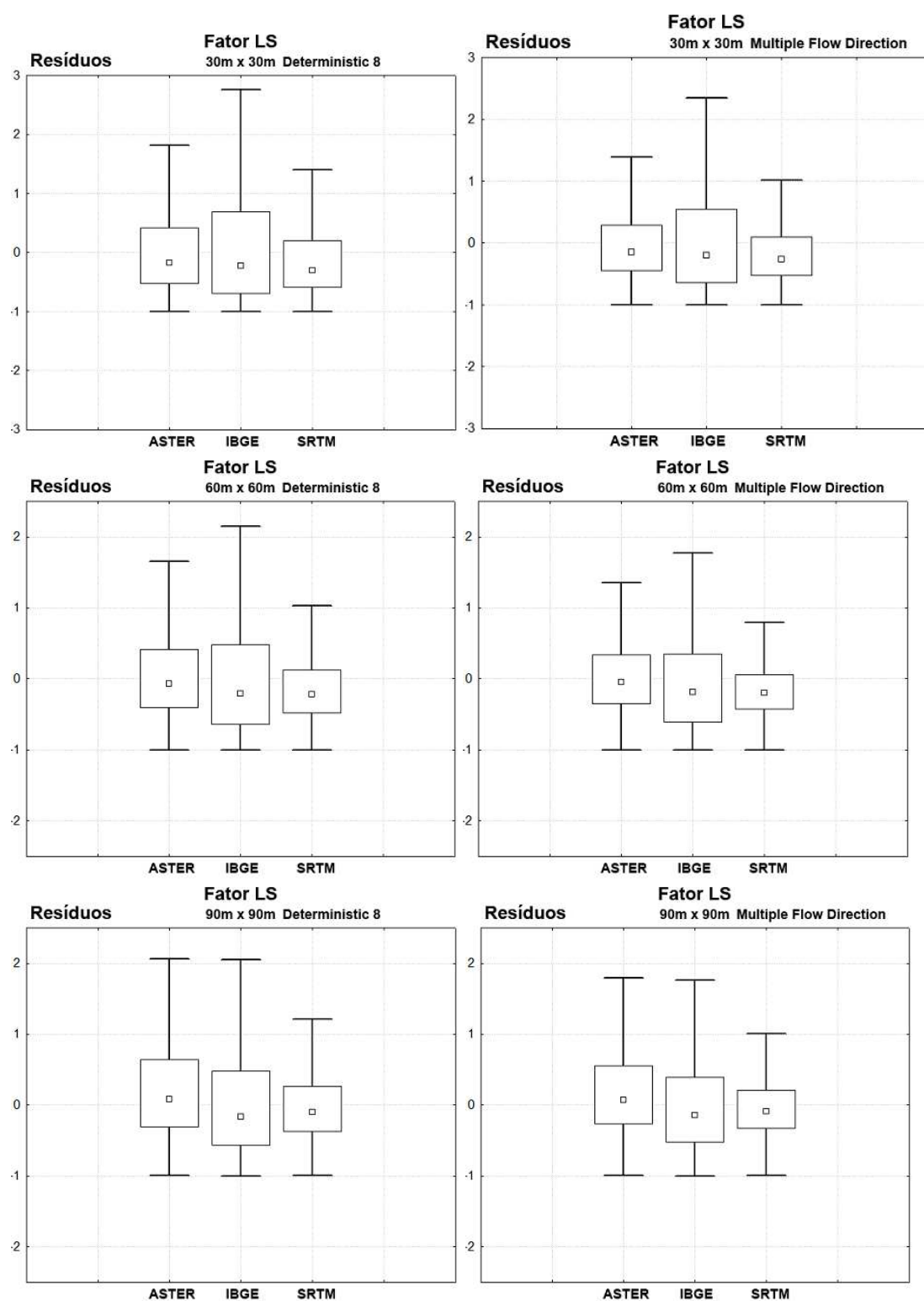


Figura C.3 – Distribuição de valores do resíduo padronizado do fator 'LS' utilizando diferentes algoritmos de distribuição do fluxo e espaçamentos de grade