



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**METODOLOGIA PARA DELIMITAÇÃO E ANÁLISE MULTIVARIADA DE
ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS DE BACIA DE DRENAGEM USANDO
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO**

SANDRO NUNES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO JÚNIOR
CO-ORIENTADOR: DR. ÉDER DE SOUZA MARTINS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRASÍLIA
MARÇO/2008

SANDRO NUNES DE OLIVEIRA

**METODOLOGIA PARA DELIMITAÇÃO E ANÁLISE MULTIVARIADA DE
ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS DE BACIA DE DRENAGEM USANDO
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração “Gestão Ambiental e Territorial” e linha de pesquisa “Geoprocessamento para a Gestão Territorial e Ambiental”, opção Acadêmica.

ORIENTADOR: PROF. DR. OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO JÚNIOR
CO-ORIENTADOR: DR. ÉDER DE SOUZA MARTINS

BRASÍLIA
MARÇO/2008

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**METODOLOGIA PARA DELIMITAÇÃO E ANÁLISE MULTIVARIADA DE
ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS DE BACIA DE DRENAGEM USANDO
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROLOGICAMENTE CORRIGIDO**

SANDRO NUNES DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior - Universidade de Brasília
(Orientador)

Dr. Éder de Souza Martins - EMBRAPA Cerrados
(Co-Orientador/Examinador Externo)

Prof^a. Dr^a. Telma Mendes da Silva - Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Examinadora Externa)

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães - Universidade de Brasília
(Suplente)

Brasília, 7 de março de 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, SANDRO NUNES DE

Metodologia para delimitação e análise multivariada de atributos morfométricos de bacia de drenagem usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido, 74 p., 297 mm, (UnB-IH-GEA-LSIE, Mestrado, Gestão Ambiental e Territorial, 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

1. Delimitação de bacias

2. Análise multivariada

3. Serra dos Órgãos

4. Geoprocessamento

I. UnB-IH-GEA-LSIE

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, Sandro Nunes de. **Metodologia para delimitação e análise multivariada de atributos morfométricos de bacia de drenagem usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido**. (Dissertação de Mestrado), Curso de Pós-graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2008. 74 f.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Sandro Nunes de Oliveira.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “Metodologia para delimitação e análise multivariada de atributos morfométricos de bacia de drenagem usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido”.

GRAU/ANO: Mestre/2008.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Sandro Nunes de Oliveira

Dedico este trabalho a Elisângela Rosa de Oliveira (*in memoriam*). Presenciei suas dificuldades, alegrias e sonhos. Seu entusiasmo com os estudos me impulsionou a continuar buscando meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, minha fortaleza, pelas superações e conquistas nesses dois anos do Mestrado.

Ao meu pai Milton, minha mãe Vanda, meus irmãos César, Milton Jr. e Henrique pelo apoio e incentivo.

Aos professores Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Éder de Souza Martins, Renato Fontes Guimarães e Roberto Arnaldo Trancoso Gomes pela dedicação, confiança, incentivo, apoio e paciência.

À professora Telma Mendes da Silva pelas críticas, sugestões e orientações dadas durante a elaboração desta dissertação.

À CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa.

À UnB pela concessão de Auxílio Alimentação e Moradia Estudantil.

Ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) pelo financiamento e ajuda de custo para o levantamento de campo.

À direção do PARNASO pela permissão e auxílio na realização dos trabalhos de campo.

À equipe do PREVFOGO do PARNASO que apoiou o trabalho de campo, ajudando no aporte logístico de locomoção e mapeamento da área.

Aos colegas de mestrado Miriam Rodrigues, Gilberto Alves, Marcus Fábio, Maria Elisabete, Clarisse Lacerda, Karla Christina, Ananda de Melo, Manoel Juarez, Leonardo Mendes, Kelly Resende, Daniel Loebmann e Ângelo Valverde pela boa convivência e pelas discussões.

A todos os colegas do LSIE, em especial a Verônica, Antônio Felipe, Robson, Wátilla, Thiago, Pascoal, Aline Menke, Pedro, Carol, Fernanda, Frederico e Leonardo Figueiredo.

Ao corpo docente da Pós-Graduação em Geografia da UnB.

Aos amigos e colegas de Apartamento da Colina Sérgio José da Costa, Ismael de Miranda Fernandes e Giliard Silva Prado.

Ao professor Dr. Homero Lacerda do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Goiás (Unidade de Anápolis) que durante a graduação me encaminhou na iniciação científica e me orientou na monografia de conclusão do curso. Seu ensinamento precioso propiciou meu ingresso no mestrado.

Aos integrantes do Grupo de Iniciação Científica em Geomorfologia do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Goiás (Unidade de Anápolis) pelas discussões, reflexões e convivência durante a graduação, que tanto contribuíram para a minha formação.

À minha madrinha Maria Aparecida, meu tio Geraldo e meus primos Rogério e Lara, pela torcida.

Ao meu amigo Cleiton Galdino de Oliveira, com quem aprendi a gostar de Geografia.

Aos amigos e parentes pela compreensão, já que a minha ausência foi constante.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS	14
RESUMO	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO I	17
INTRODUÇÃO	17
1.1 - Problema de pesquisa e objetivos	17
1.2. - Localização da área de estudo	20
1.3 - Aspectos Fisiográficos	21
1.3.1 - Clima	21
1.3.2 - Geologia	21
1.3.3 - Geomorfologia	24
1.3.4 - Solos	25
1.4 - Uso e Cobertura do solo	26
1.5 - Parque Nacional da Serra dos Órgãos	28
CAPÍTULO II	31
METODOLOGIA	31
2.1. - Elaboração do MDT hidrológicamente corrigido	31
2.1.1 - Eliminação das Depressões Artificiais	32
2.1.2 - Introdução de Informações sobre a Rede de Drenagem e Lagos	33
2.1.3 - Direção de Fluxo	36
2.2 - Delimitação das bacias de drenagem	37
2.3 - Cálculo dos atributos morfométricos das bacias de drenagem	40
2.3.1 - Amplitude Topográfica	41
2.3.2 - Desvio Padrão dos Dados Altimétricos	42
2.3.3 - Índices de Forma	42
2.4 - Análise estatística multivariada dos atributos das bacias de drenagem	43

CAPÍTULO III	45
RESULTADOS	45
3.1 - Resultados das bacias de drenagem e dos dados de morfometria	45
3.2 - Resultados da análise multivariada das bacias de drenagem	57
3.2.1 - Análise de Principais Componentes (APC).....	57
3.2.2 - Análise de Grupos	61
CAPÍTULO IV	65
CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização da área de estudo.....	20
FIGURA 2 - (A) Perfil da Travessia Petrópolis-Teresópolis com algumas das atrações turísticas disponíveis; (B) Mapa da Travessia Petrópolis-Teresópolis com a localização de algumas das atrações turísticas disponíveis	29
FIGURA 3 - Perfil da trilha de acesso ao Escalavrado com a ilustração das principais atrações turísticas realizadas na área.....	30
FIGURA 4 - (A) Pontos de nascentes obtidos a partir das drenagens no formato vetorial. (B) Detalhe da drenagem em formato de grade obtida pelo algoritmo TRACEGRID.....	34
FIGURA 5 - Procedimentos para o aprofundamento da rede de drenagem (stream burning): (A) multiplicação da máscara binária da hidrografia com o MDT subtraído do valor do rebaixamento; (B) multiplicação da máscara da hidrografia invertida com o MDT original; e (C) soma das duas grades resultantes”.....	35
FIGURA 6 - Procedimentos para a obtenção da direção de fluxo ao longo dos canais de drenagens: (a) preenchimento das depressões do MDT com a drenagem aprofundada e obtenção da direção de fluxo do método D8; (b) divisão da grade de direção de fluxo pela máscara binária resultando na direção de fluxo do método D8 para as drenagens.....	36
FIGURA 7 - Representação da direção de fluxo do método D8.....	37
FIGURA 8 - Segmentos da rede de drenagem obtidos para delimitar as bacias de: 1ª ordem (A); 2ª ordem (B); 3ª ordem (C) e 4ª ordem (D).....	39
FIGURA 9 - Bacias de 2ª ordem da hierarquia de Strahler (A). Bacias de 2ª ordem da hierarquia de Strahler mais fragmentos (B).	40
FIGURA 10 - Modelo Digital de Terreno (MDT)..	45
FIGURA 11 - Mapa de declividade.	46
FIGURA 12 - Bacias de 1ª ordem (A) e bacias de 2ª ordem (B) apenas para as ordens analisadas.....	47
FIGURA 13 - Bacias de 1ª ordem (A) e bacias de 2ª ordem (B) mais a fragmentação de toda área de estudo.....	48
FIGURA 14 - Bacias de 3ª ordem (A) e bacias de 4ª ordem (B) apenas para as ordens analisadas.....	48
FIGURA 15 - Bacias de 3ª ordem (A) e bacias de 4ª ordem (B) mais a fragmentação de toda área de estudo.....	49
FIGURA 16 - Altitude mínima para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Altitude mínima para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).	52
FIGURA 17 - Altitude máxima para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Altitude máxima para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).	52

FIGURA 18 - Altitude média para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Altitude média para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).	53
FIGURA 19 - Amplitude topográfica para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Amplitude topográfica para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).53	
FIGURA 20 - Desvio padrão para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Desvio padrão para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).	54
FIGURA 21 - Declividade média para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Declividade média para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).....	54
FIGURA 22 - Sombreamento do relevo com a indicação das fraturas e falhas.55	
FIGURA 23 - Área das bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Área das bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).	55
FIGURA 24 - Perímetro das bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B), 1ª ordem (C). Perímetro das bacias de 3ª ordem (D), 2ª ordem (E), 1ª ordem (F). Perímetro das bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).	56
FIGURA 25 - Índice de Circularidade para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Índice de Circularidade para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).56	
FIGURA 26 - Importância relativa das principais componentes para: (A) bacias de 1ª ordem, (B) bacias de 2ª ordem, (C) bacias de 3ª ordem.....	58
FIGURA 27 - Importância relativa das principais componentes para as bacias e fragmentos de: 1ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 3ª ordem (C).....	59
FIGURA 28 - APC para as bacias de 3ª ordem: 1ª componente (A); 2ª componente (B); 3ª componente (C). APC para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos: 1ª componente (D); 2ª componente (E); 3ª componente (F).....	60
FIGURA 29 - APC para as bacias de 2ª ordem: 1ª componente (A); 2ª componente (B); 3ª componente (C). APC para as bacias de 2ª ordem mais fragmentos: 1ª componente (D); 2ª componente (E); 3ª componente (F).....	60
FIGURA 30 - APC para as bacias de 1ª ordem: 1ª componente (A); 2ª componente (B); 3ª componente (C). APC para as bacias de 2ª ordem mais fragmentos: 1ª componente (D); 2ª componente (E); 3ª componente (F).....	61
FIGURA 31 - Método Hierárquico por Aglomeração com distância Euclidiana para as bacias apenas de 3ª ordem (A) e para as bacias de 3ª ordem e fragmentos (B). Classificação pelo Método K-Means para as bacias apenas de 3ª ordem (C) e para as bacias de 3ª ordem e fragmentos (D).	63

FIGURA 32 - Classificação pelo Método K-Means para as bacias apenas de 2ª ordem (A) e para as bacias de 2ª ordem e fragmentos (B). 64

FIGURA 33 - Classificação pelo Método K-Means para as bacias apenas de 1ª ordem (A) e para as bacias de 1ª ordem e fragmentos (B). 64

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - Matriz de correlação dos parâmetros morfométricos para as bacias de 1^a ordem..... 51

TABELA 2 - Matriz de correlação dos parâmetros morfométricos para as bacias de 2^a ordem..... 51

TABELA 3 - Matriz de correlação dos parâmetros morfométricos para as bacias de 3^a ordem..... 51

LISTA DE ABREVIATURAS

APA – Área de Proteção Ambiental

APC – Análise de Principais Componentes

DEM – Digital Elevation Model

LSIE – Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais

MDT – Modelo Digital de Terreno

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PARNASO – Parque Nacional da Serra dos Órgãos

UC – Unidade de Conservação

UTM – Universal Transverse Mercator

RESUMO

A topologia e geometria das redes de drenagem e bacias de drenagem têm contribuído substancialmente para os estudos em geomorfologia e hidrologia, incluindo modernos modelos de evolução da paisagem. O objetivo desse trabalho é realizar análises em bacias de drenagem na Serra dos Órgãos usando métodos automáticos e obter padrões morfológicos da paisagem a partir da análise multivariada de seus atributos morfométricos. A metodologia pode ser dividida nas seguintes etapas: (a) construção do Modelo Digital de Terreno (MDT) hidrologicamente corrigido, (b) delimitação das bacias de drenagem a partir do MDT considerando a hierarquização de bacias de drenagem proposta por Strahler, (c) cálculo dos atributos morfométricos das bacias de drenagem e (d) análise estatística multivariada (análise de grupos e análise de principais componentes). Neste trabalho são apresentados algoritmos para a extração da rede de drenagem e dos limites de bacias a partir do MDT como também muitos problemas pertinentes. A preparação do MDT incluiu o preenchimento de depressões, introdução da drenagem e o cálculo da direção de fluxo e grade de acumulação de fluxo. A análise de principais componentes reduziu os atributos morfométricos da bacia de drenagem em três fatores, com alta porcentagem da variância original. A análise de grupos indicou a presença de sete grupos de bacia. Os grupos estabelecem típicos padrões morfológicos. O uso de mesma seqüência de técnicas são indicadas para outras áreas.

Palavras chave: Bacias de drenagem, rede de drenagem, modelo digital de terreno, análise multivariada, Serra dos Órgãos.

ABSTRACT

The topology and geometry of the drainage networks and drainage basins have contributed substantially to geomorphology and hydrology studies, including modern concepts of landscape evolution. The aim of this study is to build drainage basin models from Serra dos Órgãos basins by using automated methods; and to obtain morphological patterns from multivariate analysis of their morphometric attributes. The methodology can be subdivided into four stages: (a) elaboration of the hydrologically corrected DEM; (b) catchment boundaries from digital elevation model (DEM) according to Strahler's drainage network order; (c) determination of the drainage-basin morphometric attributes, and (d) multivariate analysis (factor analysis and cluster analysis). In this paper algorithms for drainage network extraction and catchment boundaries from DEMs, as well as their most pertinent problems, are presented. The DEM preparation included pit filling, stream burning and the calculation of flow direction and flow accumulation grids. The APC reduced the morphometric properties of the drainage basins in three factors, with high percentage of the original variance. Cluster analysis indicates that seven main groups of basins are present. The clusters establish typical morphological patterns. Uses of the same sequence of techniques in other geographic areas are suggested.

Keywords: Watersheds, drainage network, digital elevation model, multivariate analyses, Serra dos Órgãos.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Problema de pesquisa e objetivos

As bacias de drenagem constituem unidades fisiográficas naturais de planejamento que podem ser tratadas como um sistema onde há entradas, saídas e transformações. Desta forma, os modelos de gerenciamento dos recursos hídricos assumem a bacia hidrográfica, neste trabalho denominada bacia de drenagem, como a unidade geográfica de referência ou de intervenção pelo fato de consistir num dos caminhos preferenciais de boa parte das relações de causa-efeito, principalmente as que envolvem o meio ambiente. Esse conceito está presente na Lei 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, que define a “Bacia Hidrográfica” como “unidade territorial” para a operacionalização do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Neste propósito, proliferam-se órgãos e associações para a gestão da água em bacias de drenagem com o escopo de estabelecer a capacidade, disponibilidade e possibilidade de crescimento e exploração. A demanda crescente de água necessita de uma análise que considere o balanço hídrico e a renovação do sistema natural. Dentro dessa perspectiva, o gerenciamento de bacias de drenagem é um instrumento que orienta o poder público e a sociedade, no longo prazo, na utilização e monitoramento dos recursos naturais, econômicos e sócio-culturais, de forma a promover o desenvolvimento sustentável (Lanna, 1995).

Os estudos das bacias hidrográficas podem ser abordados sob o ponto de vista morfométrico e dinâmico (Pinto et al., 1973; Llamas, 1993; Silveira, 2001). O estudo morfométrico engloba as análises referentes à hierarquia fluvial, análise areal, linear e hipsométrica extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de

satélites que indicam as características físicas da bacia. Os dados dinâmicos de uma bacia de drenagem são resultantes de coletas e medições obtidas em campo e a partir da elaboração de índices estatísticos e modelos matemáticos referentes à precipitação, infiltração, evaporação e evapotranspiração, escoamento superficial, regime dos cursos d'água, água subterrânea e transporte de sedimentos. Muitos estudos correlacionam informações morfométricas para prever dados dinâmicos (Mark, 1983).

Um dos estudos morfométricos em bacias de drenagem são as classificações geomorfológicas, cuja proposta inicial foi desenvolvida por Meis et al. (1982) e que utiliza o cálculo do desnivelamento altimétrico para as bacias de 1ª e de 2ª ordens da hierarquia de Strahler. Uma adaptação dessa metodologia foi realizada por Silva (2002, 2003) que para as regiões de topografia suave como as planícies fluviais e flúvio-marinhas o cálculo do desnivelamento altimétrico é efetuado pela diferença entre a curva de nível de valor mais elevado pela de valor mais baixo que delimita a ruptura de declive da encosta com o fundo plano. Essa adaptação também se aplica para colinas e morros isolados onde o contorno da unidade é extraído da curva de nível que delimita a ruptura de declive entre as encostas dessas feições e as áreas planas.

Segundo Silva (2003) essa metodologia possibilita maior detalhamento das unidades de relevo mapeadas, com uma maior precisão dos limites traçados, permitindo avançar sobre o caráter extremamente descritivo dos mapas geomorfológicos clássicos e fornece elementos capazes de subsidiar um melhor conhecimento sobre a evolução e a geodinâmica do relevo. O desnivelamento altimétrico permite a caracterização das áreas planas e reflete o grau de encaixamento fluvial ou entalhamento erosivo das encostas, que por sua vez, associa-se intimamente a variações lito-estruturais e/ou tectônicas.

A delimitação das bacias de drenagem e a obtenção do desnivelamento altimétrico para esse tipo de classificação geomorfológica são obtidas manualmente a partir de cartas topográficas e posterior reconhecimento de campo. Nas duas últimas décadas, entretanto, as obtenções das informações hidrográficas têm sido conseguidas diretamente a partir de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e pelo emprego de modelos hidrológicos distribuídos, que

permitem uma maior sensibilidade das propriedades espaciais. Esses modelos possibilitam uma boa simulação do fluxo da água e conseqüentemente uma maior precisão na delimitação das bacias e sub-bacias de drenagem. As principais vantagens do emprego de métodos automatizados são: rapidez, menor subjetividade e maior facilidade de reprodução do que as técnicas manuais (Tribe, 1992). Com o propósito de alcançar esse tipo de representação torna-se primordial o emprego de um MDT que descrevam de forma mais fidedigna possível a estrutura interna da rede de drenagem.

Além da amplitude topográfica, vários atributos podem ser obtidos de forma automatizada para análises em bacias de drenagem. Costa et al. (2007) obteve o índice de circularidade, densidade de drenagem, declividade média e perda de solos para a caracterização de fragilidade ambiental do Estado do Rio de Janeiro. Tonello (2005) obteve dados referentes à área, perímetro, comprimento total dos cursos d'água, densidade de drenagem, índices de forma e características do relevo para análise hidroambiental. Hott & Furtado (2005) obtiveram, dentre outros, a altitude mínima, máxima e amplitude, coeficiente e índice de rugosidade.

A grande quantidade de dados disponíveis para análise exige novas formas de integração de informações. Nesta perspectiva, análises multivariadas como álgebra matricial, análise de agrupamentos e análise de principais componentes tem sido utilizadas em estudos geológicos (Landim, 2006), levantamento de fontes hídricas subterrâneas (Brito et al., 2006), solos (Grobe & Marques, 2006), pecuária (Sachs et al.), mercado bancário (Rosa, 1999), e em outras áreas do conhecimento. As análises multivariadas permitem o agrupamento dos dados pela similaridade e dissimilaridade, permitindo simplificar e organizar o montante de informações levantadas.

Nesta perspectiva, os objetivos dessa pesquisa de mestrado foram apresentar uma metodologia de delimitação automatizada de bacias de drenagem e inserir novos atributos morfométricos para a realização de análise multivariada com a finalidade de caracterizar compartimentos geomorfológicos.

1.2. - Localização da área de estudo

A área escolhida para a realização desse estudo localiza-se entre as coordenadas UTM 7.496.000N - 718.000E e 7.530.000N - 682.000E sendo parte dos municípios de Petrópolis, Teresópolis, Guapimirim, Magé, Cachoeiras de Macacú e Duque de Caxias na região serrana do Estado do Rio de Janeiro (**Figura 1**). Essa área é parte das seguintes cartas topográficas do IBGE em escala 1:50.000: Itaipava (SF-23-Z-B-I-4), Teresópolis (SF-23-Z-B-II-3), Petrópolis (SF-23-Z-B-IV-2) e Itaboraí (SF-23-Z-B-V-1).

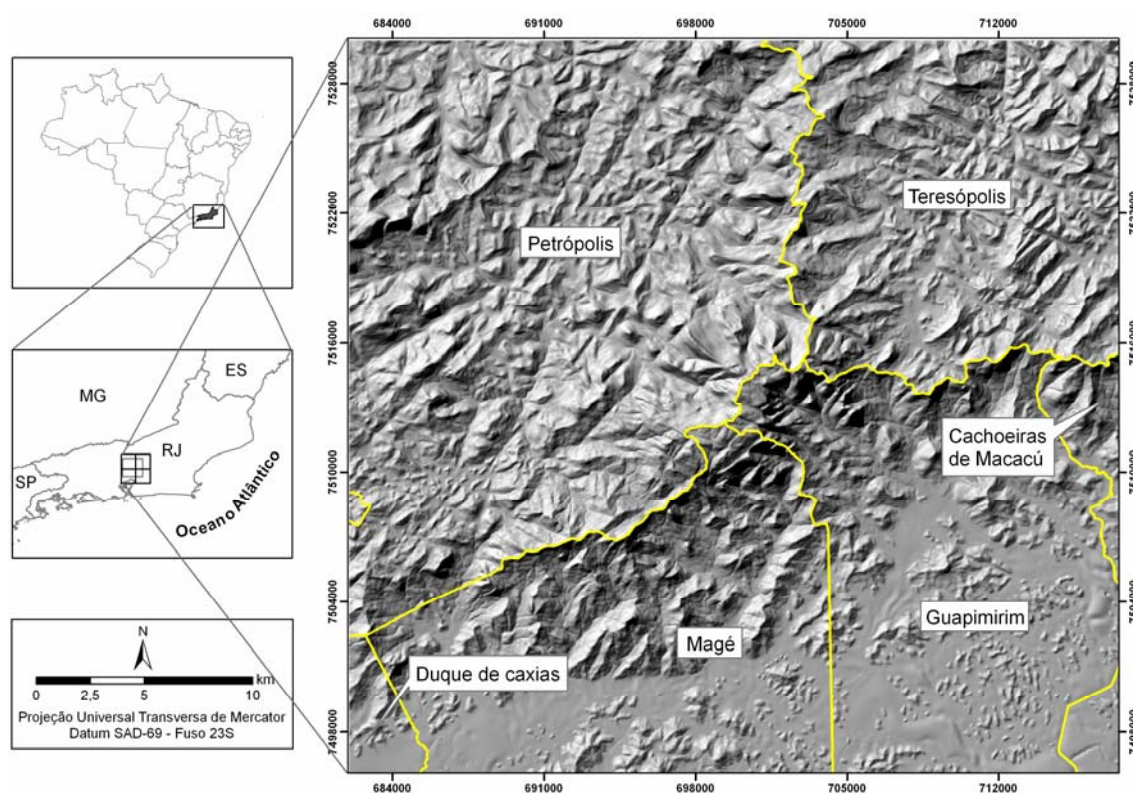


FIGURA 1 - Localização da área de estudo.

A escolha dessa área deve-se ao fato de englobar o Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) que é uma das áreas em que está sendo desenvolvidas as atividades do Projeto SIG-Ecotur do Ministério do Meio Ambiente. O SIG-Ecotur (Sistema de Informações Geográficas para o Desenvolvimento do Ecoturismo) é uma estratégia do Programa Nacional de Ecoturismo, que visa coletar, sistematizar e disseminar informações sobre atrativos ecoturísticos, especialmente em áreas protegidas e áreas em entorno. O produto final do projeto é a implementação de um SIG que será disponibilizado na

internet de forma a divulgar e incentivar as atividades ecoturísticas. Parte dos dados desse trabalho servirá para abastecer o banco de dados do Projeto SIG-Ecotur.

1.3 - Aspectos Fisiográficos

1.3.1 - Clima

O clima é mesotérmico brando superúmido com temperatura média anual variando de 13° a 23°C, umidade relativa do ar de 80 a 90% e índice pluviométrico médio de 2.000mm. Possui verões brandos, sem estação seca, caracterizado pela abundância de precipitações nos meses de outubro a março, nos quais concentram cerca de 70 a 80% das precipitações e inverno com temperaturas e pluviosidade menores, atingindo o mínimo entre os meses de junho e julho (Nimer, 1977).

A dinâmica das massas de ar na região se caracteriza pelo domínio da Massa Tropical Atlântica que apresenta umidade e temperatura relativamente altas, enquanto que a entrada da Massa Polar Atlântica é responsável pela umidade e temperatura seca e fria. A Serra dos Órgãos funciona como uma barreira orográfica impedindo a entrada das massas de ar vindas do Atlântico, o que faz com que as vertentes voltadas para o oceano sejam mais úmidas que aquelas voltadas para o continente (PARNASO, 2007).

1.3.2 - Geologia

A área de estudo pertence ao Sistema Orográfico da Serra do Mar, constituída essencialmente por gnaisses bandados do Complexo Paraíba do Sul e por granitos pós-tectônicos da Suíte Intrusiva da Serra dos Órgãos (RadamBrasil, 1983). A geologia é representada por litologias pré-cambrianas e eopaleozóicas individualizadas nas seguintes unidades de mapeamento: (a) Sedimentos Aluvionares, (b) Complexo Rio Negro, que congrega migmatitos heterogêneos e biotita gnaisses graníticos; (c) Batólito Serra dos Órgãos, representado por biotita granitos e granodioritos gnáissicos; (d) Unidade Santo Eduardo, (e) leucogranitos gnáissicos, (f) granitos pós-colisionais (granitos Andorinha e Nova Friburgo), e (g)

Corpos intrusivos de idade mesozóica-cenozóica (Ferrari et al., 1981; Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980; Penha et al., 1979).

Os Sedimentos Aluvionares são representados por areias e argilas de planícies de inundação, depósitos de várzea, depósitos flúvio-marinhos, depósitos paludiais (turfa), marinhos e fluviais, às vezes feldspáticos, com ou sem matéria orgânica, localmente com concentrações de conchas (Ferrari et al., 1981; Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980; Penha et al., 1979).

O complexo Rio Negro é subdivido em duas unidades: (a) Migmatitos – caracterizam-se por serem heterogêneos bem diferenciados, predominantemente estromáticos, com variações para tipos oftálmicos, pseudo-oftálmicos e nebulíticos. Nos termos mais homogêneos estão presentes ainda estruturas tipo schollen, schlieren, agamáticas e dictionítica. São constituídos por um conjunto de biotita gnaisses, às vezes anfibolíticos, contendo eventualmente granada, bandeados em leitos centimétricos a métricos, intercalados com leucossoma granítico. (b) Biotita gnaisse granítico – caracteriza-se por ser claro de granulação média a fina. Zonas mais heterogêneas com estruturas migmatíticas podem conter restitos básicos. Nas proximidades do Batólito Serra dos Órgãos, encontra-se injetado por uma série de veios pegmatíticos e aplíticos de composição granítica. Seus contatos com os migmatitos estromáticos da subunidade anterior são transicionais (Ferrari et al., 1981; Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980; Penha et al., 1979).

O Batólito Serra dos Órgãos inclui biotita granitos a granodioritos gnáissicos de granulação média à grossa e índice de cor leuco a mesocrático. Nos termos leucocráticos é comum a presença de granadas. A foliação é marcada por aglomerados de biotita e hornblenda, bem como por cristais de quartzo e de feldspato amendoado. É comum também a presença de diques de aplito e pegmatito cogenéticos. Ao microscópio, as rochas que compõem o batólito apresentam textura levemente orientada, granoblástica e mais localmente lepidoblástica. Sua composição mineral está representada, sobretudo por microclina amendoada “em gotas”, quartzo grosseiro, plagioclásio, biotita, hornblenda e mais raramente granada. Os acessórios mais comuns são apatita,

titanita, alanita, zircão e opacos (Ferrari et al., 1981; Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980; Penha et al., 1979).

A Unidade Santo Eduardo inclui milonito gnaiss e blastomilonito predominantes, geralmente bandeados, porfíclásticos e porfiroblásticos, portando intercalações de variada litologia além de intercalações de anfibólio - (biotita) gnaiss migmatizado interestratificado com quartzo xisto. Também se apresenta como xisto gnaissóide transicionando a biotita gnaiss (predominante), porfiroclástico a porfiroblástico com faixa discreta a francamente migmatizada e migmatitos estromáticos bem diferenciados, com paleossoma constituído de (hornblenda) - biotita - plagioclásio gnaisses bandados, de granulação fina a média e leucossoma de gnaisses quartzo-feldspáticos (Ferrari et al., 198).

Os leucogranitos gnaisses são rochas de granulação fina a média com poucos minerais máficos. Em geral, exhibe composição granítica e estrutura homófona (sem feições macro ou microscópicas de deformação interna). É freqüente a ocorrência de diques de aplogranito, aplito e pegmatito cogenéticos. Na região de Nova Friburgo Tubinambá observou a presença de encraves microgranulares e granulares de hornblenda gabro (Ferrari et al., 1981; Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980; Penha et al., 1979).

Os granitos pós-colisionais são representados pelo Granito Andorinha e Nova Friburgo. O Granito Andorinha consiste de biotita granito porfirítico fino a médio, de coloração cinza. Na zona central evidencia comportamento homogêneo e isotrópico e à medida que se dirige as bordas observam-se estruturas de fluxo magmático enfatizados por megacristais de microclínio orientados. Próximos aos contatos, comumente, estão presentes xenólitos das encaixantes, parcialmente digeridos ou não, com as mais variadas formas, bem como de veios aplíticos em toda sua extensão. Ao microscópio a rocha exhibe textura granular hipidiomórfica. Os minerais presentes são quartzo, microclínio, plagioclásio e biotita. Os acessórios mais comuns são titanita, alanita, hornblenda, apatita, zircão, opacos e muscovita. O Granito Nova Friburgo apresenta duas suítes graníticas dessa unidade: (a) grande corpo de forma circular denominado de maciço granítico de Frades, rocha porfirítica, de granulação grossa, que exhibe estrutura tanto homófona como fluidal localizado na porção centro-leste da folha Teresópolis; (b)

pequenos corpos de granitos róseos a cinza, equigranulares e faneríticos de granulação média. Em ambas as fácies ocorrem numerosas inclusões irregulares ou tabulares de rocha ígnea cinza, cuja composição é quartzodiorítica (Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980).

Os Corpos intrusivos são representados por diques de diabásio e gabros. Apresentam orientados preferencialmente segundo a direção NE-SW/subvertical. Ao microscópio os minerais essenciais em ordem decrescente são: plagioclásio (andesina-labradorita), piroxênio (augita) e opacos (magnetita e possivelmente ilmenita) além de acessórios como apatita e quartzo. Minerais de alteração como carbonato, anfibólio, biotita e clorita também estão presentes. Predominam dois tipos de textura: intersetal e intergranular (Ferrari et al., 1981; Penha et al., 1981; Pinto et al., 1980; Penha et al., 1979).

1.3.3 - Geomorfologia

A geomorfologia está contida no Domínio Morfoestrutural do Planalto Atlântico e no Domínio das Depressões Tectônicas Mesozóico-Cenozóicas. Esses domínios subdividem-se nas Regiões do Planalto e Escarpas da Serra dos Órgãos e na Região do Rift da Guanabara (Silva, 2003).

A unidade morfoestrutural Planalto e Escarpas da Serra dos Órgãos se distribui continuamente de Itaguaí, a sul do Estado, até o município de Campos de Goitacazes, a norte. É um segmento de grande representatividade areal e de altitudes elevadas, chegando a atingir 2263m. Em alguns pontos o contato com a Depressão Interplanáltica da Baía de Guanabara é brusco e retilíneo. Possui controle estrutural do embasamento pré-cambriano, onde a dissecação atual da paisagem segue a orientação preferencial NNE-SSW representada pela disposição das unidades de Morros e Degraus reafeiçoados, tanto na borda interiorana quanto para a borda voltada para o litoral e pela unidade de terraços e planícies fluviais (Silva, 2003).

A unidade morfoestrutural da Região do Rift da Guanabara é influenciada pelo quadro evolutivo do Graben da Guanabara, onde o magmatismo e a sedimentação foram tectonicamente controlados por campos de paleotensões com atuação em todo o seu domínio. Nesta Região foram, inicialmente,

reconhecidos os seguintes compartimentos geomorfológicos: Maciços Litorâneos representados por um conjunto de feições de degraus escarpados e degraus e/ou serras reafeiçoados de orientação geral E-W, com inflexões para NE-SW; Depressão da Baía de Guanabara e Região dos Lagos, representadas por colinas com altitudes de 40 a 150m, configurando-se, na maior parte das vezes, como domínio morfológico de significativo alinhamento, que acompanham a orientação regional NE-SW (Silva, 2003).

1.3.4 - Solos

Os levantamentos existentes para a área estudada apresentam escala reduzida e são aplicáveis apenas para estudos regionais (Embrapa, 1992; UERJ, 1999). Nos estudos existentes são identificadas as seguintes classes de solos: Afloramentos Rochosos, Neossolos Litólicos, Cambissolos e Argissolos em unidades simples ou associações.

Os Afloramentos Rochosos ocorrem nas porções de declividade mais elevada e instáveis devido aos freqüentes eventos de escorregamentos. Representam a exposição do material de origem para o início da formação dos solos (Embrapa, 1992; UERJ, 1999).

Os Cambissolos podem ser encontrados em várias situações dentro da paisagem, em relevo desde suave ondulado ao escarpado, ocorrendo nos compartimentos com maior declividade e nas vertentes com declives mais acentuados. Compreende solos minerais, não hidromórficos, com o horizonte A seguido de B incipiente (poucos centímetros) subjacente ao C, pouco profundos até profundo com presença abundante de minerais primários facilmente intemperizáveis e relação silte/argila elevada. Apresentam grande variação das propriedades químicas e físicas, mas apresentam maior potencial erosivo (Embrapa, 1992; UERJ, 1999).

Os Argissolos são solos constituídos por material mineral com argila de atividade baixa e horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A. O acréscimo de argila em profundidade e a capacidade de troca de cátions inferior a 27 cmol/kg de solo são os principais atributos diagnósticos válidos para todos os Argissolos. Os Argissolos Vermelho-Amarelos apresentam em geral maior relação

textural entre os horizontes A e o horizonte B do que os Argissolos Vermelhos, e são por isso, em igualdade de condições ambientais, mais vulneráveis à erosão. Os Argissolos apresentam predominantemente argila de atividade baixa, mas a capacidade de adsorção desta fração, para a mesma textura, é em geral, ligeiramente superior à dos Latossolos (Embrapa, 1992; UERJ, 1999).

Os Neossolos Litólicos ocorrem em áreas de transição entre os afloramentos rochosos e Cambissolos. São solos pouco desenvolvidos com pequena espessura e contato lítico dentro de 50 cm da superfície. Possuem horizontes pouco desenvolvidos, estando composta de horizonte A sobreposto diretamente na rocha matriz ou sobre o horizonte C. Possuem textura em maioria média, com abundância de material grosseiro. A fertilidade é geralmente muito baixa e muito dependente do material de origem e aporte de material orgânico e ciclagem superficial de nutrientes, já que esses locais mais altos são dispersores de fluxos, quase não recebendo contribuição de materiais. São solos muito susceptíveis aos processos de erosão, uma vez que apresentam taxas diferenciais de infiltração entre os horizontes A e C ou camada rochosa (Embrapa, 1992; UERJ, 1999).

1.4 - Uso e Cobertura do solo

O uso e cobertura do solo são bem variados, incluindo parte das áreas urbanas de Petrópolis, Teresópolis, Guapimirim, Magé e Duque de Caxias; áreas agrícolas; pastagens e áreas de preservação ambiental como o Parque Nacional da Serra dos Órgãos e a Área de Proteção Ambiental de Petrópolis.

No Parque Nacional da Serra dos Órgãos e na Área de Proteção Ambiental de Petrópolis a vegetação é representada pelas formações florestais e campestres (Alonso, 1977; Martinelli, 1989; PARNASO, 2007), sendo que pela classificação de Rizzini (1979) é possível identificarmos quatro fitofisionomias da Mata Atlântica: floresta pluvial baixo-montana, floresta pluvial montana, floresta pluvial alto-montana e campos de altitude.

A floresta pluvial baixo-montana localiza-se abaixo de 500 e 800 metros de altitude. Nesta formação predominam solos profundos e bem drenados, especialmente Argissolos e Latossolos, onde a umidade existente é menor que na

Floresta Montana. Nos fundos de vales e áreas com umidade semelhante às áreas mais altas a vegetação é similar a da Floresta Montana. Em geral, as maiores árvores, que compõem o dossel superior, possuem entre 15 e 20 m de altura e troncos com diâmetro máximo de 60 cm. Há uma menor densidade de árvores que na Floresta Montana e pouca presença de epífitas, como bromélias, orquídeas e cipós. Há também poucas palmeiras e fetos arborescentes (samambaias), muito comuns na Floresta Montana. Esta fisionomia vegetal apresenta normalmente apenas o estrato arbóreo, com o interior da mata composto por uma densa vegetação, mas sem estratos definidos. Em algumas áreas é possível diferenciar os estratos arbustivo-arbóreo, arbustivo e herbáceo. Em geral, a camada de folhas e matéria orgânica (serrapilheira) é pouco espessa e o solo, na época seca, fica ressecado (Alonso, 1977; Martinelli, 1989; PARNASO, 2007).

A floresta pluvial montana ocorre em altitudes que variam de 600 e 1600 metros, especialmente em ambientes associados a solos bem desenvolvidos, como Argissolos e Latossolos. Estas são as que possuem maior estratificação vegetal entre as diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica. Os solos mais profundos permitem a ocorrência de árvores de grande porte. A estrutura dessa mata possui variações dependentes das condições específicas de cada área, mas em muitas formações as maiores árvores atingem até 40 m, e o dossel superior (conjunto contínuo de copas de árvores) encontra-se entre 25 e 30 m. Além do estrato superior, encontram-se formações com até mais quatro estratos relativamente bem definidos, sendo composta por dois estratos arbóreos e dois arbustivos, além do estrato herbáceo, que garante boa interceptação das águas de chuvas (Alonso, 1977; Martinelli, 1989; PARNASO, 2007).

A floresta pluvial alto-montana localiza-se entre as altitudes de 1300 e 1800 metros em solos rasos, especialmente Cambissolos. É uma típica mata úmida, localizada nas partes altas que freqüentemente é envolta por densas nuvens durante longos períodos, também conhecida com mata nebulosa. A formação vegetacional é dominada por espécies de pequeno porte com altura entre 5 e 10 metros. As árvores possuem troncos tortuosos e cobertos por camada de musgos e epífitas. O sub-bosque desta mata é dominado por significativa diversidade de

espécies arbustivas. As famílias mais comuns são as mirtáceas (*Eugenia* sp), proteáceas (*Roupala* sp), melastomatáceas (*Tibouchina*, *Miconia*), malpigiáceas. As epífitas são abundantes, com destaque para as grandes bromeliáceas entre as quais se encontram algumas espécies terrestres. As bordas de afloramentos rochosos são tomadas por pteridófitas e briófitas de diversas espécies. Nessas áreas da floresta é elevado o número de espécies endêmicas (Alonso, 1977; Martinelli, 1989; PARNASO, 2007).

Os campos de altitude situam-se acima dos 1800 metros, com baixas declividades entremeadas com afloramentos rochosos, onde as temperaturas chegam próximas de 0°C no inverno. Os solos típicos são hidromórficos, mantidos encharcados a maior parte do ano e muito ricos em matéria orgânica. É formado por vegetação baixa e mais aberta, dominada por vegetação herbáceo-arbustiva que se desenvolve sobre os afloramentos rochosos. As condições ambientais, sobretudo a temperatura, sempre muito fria, têm grande influência na distribuição das espécies. Desta forma, a composição florística dos campos de altitude é muito distinta das demais formações do seu entorno, típica de Mata Atlântica (Alonso, 1977; Martinelli, 1989; PARNASO, 2007).

1.5 - Parque Nacional da Serra dos Órgãos

O Parque Nacional da Serra dos Órgãos é uma área muito visitada, sendo que as atrações turísticas incluem centros de visitantes, museu, áreas de lazer com piscina e bosque, trilhas (**Figura 2**), cachoeiras, pontos de escalada e *rappel* como o Dedo de Deus, Escalavrado (**Figura 3**), Agulha do Diabo, *Big Wall* Pedra do Sino e vários outros.

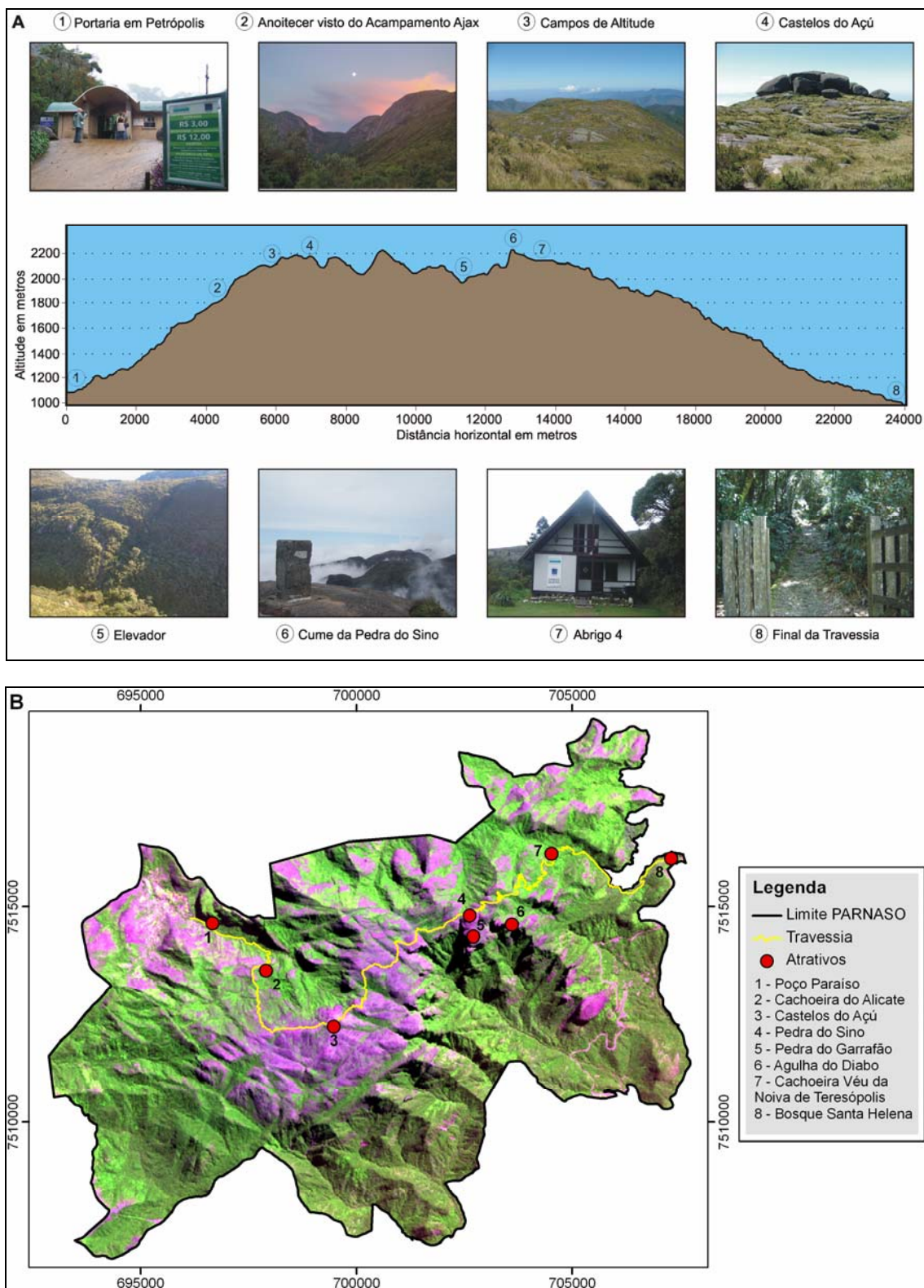


FIGURA 2 – (A) Perfil da Travessia Petrópolis-Teresópolis com algumas das atrações turísticas disponíveis; (B) Mapa da Travessia Petrópolis-Teresópolis com a localização de algumas das atrações turísticas disponíveis. Fonte das fotos: Éder de Souza Martins.

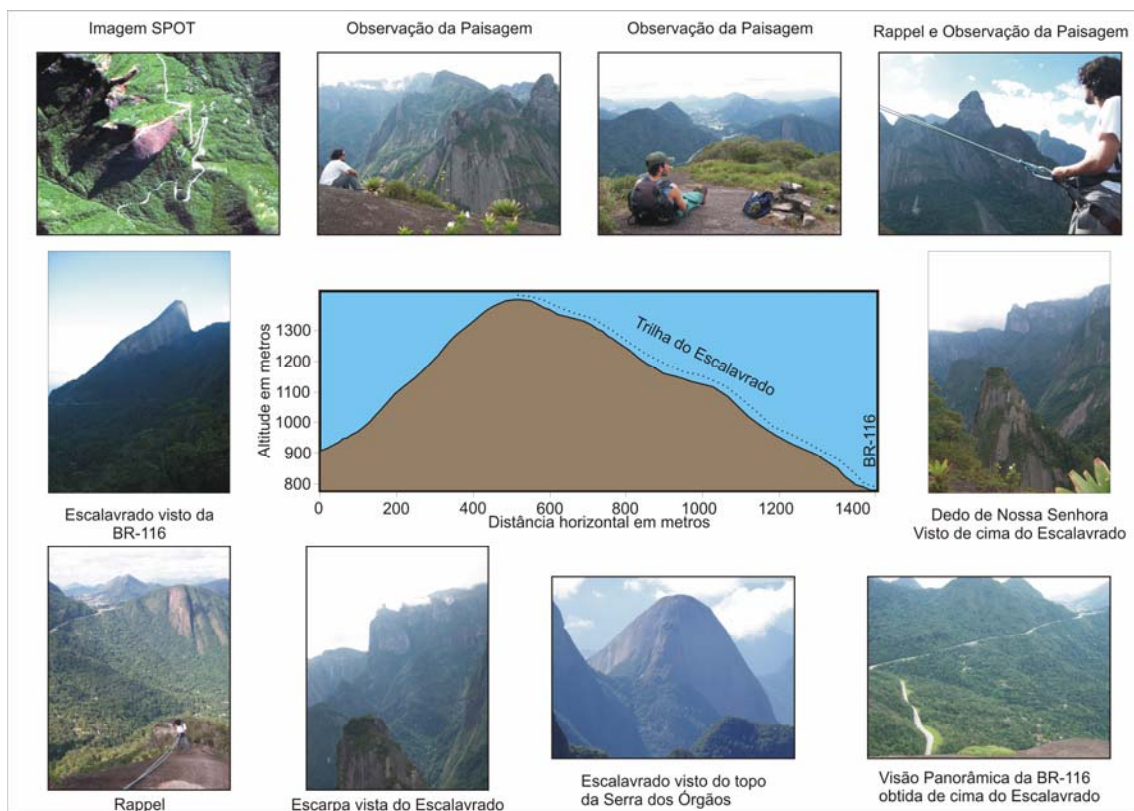


FIGURA 3 - Perfil da trilha de acesso ao Escalavrado com a ilustração das principais atrações turísticas realizadas na área. Fonte das fotos: Banco de dados do Projeto SIG-Ecotur, Ministério do Meio Ambiente.

CAPÍTULO II

METODOLOGIA

A metodologia pode ser dividida nas seguintes etapas: (a) construção do Modelo Digital de Terreno (MDT) hidrologicamente corrigido, (b) delimitação das bacias de drenagem; (c) cálculo dos atributos morfométricos das bacias de drenagem e (d) análise estatística multivariada das bacias de drenagem.

2.1. - Elaboração do MDT hidrologicamente corrigido

Na confecção do MDT utilizou-se a base cartográfica na escala 1:50.000, em formato digital, contendo curvas de nível com equidistância de 20 metros, pontos cotados e hidrografia. Esses dados foram corrigidos e posteriormente interpolados pelo módulo TOPOGRID do programa ArcInfo (ESRI, 1990). Na correção das curvas de nível foram conferidos a conectividade, a falta de segmentos de linhas e os valores das cotas. Para as drenagens conferiu-se o lineamento da drenagem em relação às curvas de nível, a conectividade, o tamanho mínimo de segmento de linha e a direção de fluxo. Por fim, realizou-se a conferência dos valores presentes nos pontos cotados.

A interpolação pelo método TOPOGRID emprega o algoritmo desenvolvido por Hutchinson (1989) que objetiva criar um MDT para estudos hidrológicos. O algoritmo foi elaborado para produzir um acurado MDT que contenha as propriedades das drenagens e os dados de direção de fluxo. O procedimento conjuga tanto o esforço de manter as características hidrográficas, a remoção de dados espúrios relativos a pontos de depressões ou de elevações e uma técnica de interpolação por diferenças finitas (Hutchinson, 1989). O MDT foi gerado com uma resolução espacial de 10 metros. Os valores de altimetria da área de estudo apresentam uma grande variação, que vão desde o nível do mar até 2263 metros, o que caracteriza diferentes configurações geomorfológicas.

Além do procedimento de interpolação para a obtenção de um MDT hidrologicamente corrigido devem ser considerados os seguintes aspectos: (a) eliminação das depressões artificiais, (b) introdução de informações sobre as localizações de rede de drenagem e lagos em regiões planas, e (c) limitações inerentes dos métodos de obtenção da direção de fluxo (Martz & Garbrecht, 1995; Turcotte et al. 2001).

2.1.1 - Eliminação das Depressões Artificiais

No MDT as depressões devem ser preenchidas de forma a permitir uma continuidade do fluxo. Algumas depressões são provenientes de erros introduzidos durante o processo de interpolação dos dados, enquanto que outras são feições reais da topografia, tais como as presentes em ambientes cársticos. As depressões artificiais são usualmente concentradas em regiões de inundação ou nas proximidades de determinados tipos de paisagem onde um MDT de baixa resolução não consegue representá-los, tais como nas áreas de múltiplos canais, dunas ou depósitos de sedimentos. Assim, o número de depressões artificiais normalmente é inversamente proporcional a resolução do MDT (Lindsay & Creed, 2005).

Várias técnicas são propostas para o preenchimento das depressões artificiais. Inicialmente, foram utilizadas técnicas de suavização do terreno, entretanto esses podem provocar um efeito indesejável do aumento das áreas de depressões (O'Callaghan & Mark, 1984). Um método mais robusto foi desenvolvido por Jenson & Domingue (1987) que apenas eleva as células contidas dentro das depressões. Esse método possui ampla divulgação estando implementado no programa ArcInfo (ESRI, 1990) e no programa livre GRASS. Recentemente outros métodos têm sido propostos como: ajuste da elevação da depressão considerando a sua posição na bacia, que objetiva reproduzir um perfil mais natural do canal (Tianqi et al., 2003); utilização de corte do terreno para reforçar o fluxo convergente (Soille et al., 2003) e a adoção de método baseado em processos físicos hidrogeomorfológicos (Grimaldi et al., 2007). No presente trabalho é utilizado o método Jenson & Domingue (1987).

2.1.2 - Introdução de Informações sobre a Rede de Drenagem e Lagos

Enquanto os diferentes algoritmos de hidrologia normalmente produzem resultados significativos em relevos acentuados, maior dificuldade ocorre em áreas relativamente planas. Assim, o maior esforço tem sido realizado na modelagem de fluxo de água em terrenos quase planos onde a canalização do rio é muito pequena com ausência do gradiente que impede uma delimitação computacional. Desta forma, muitos dos erros na descrição dos canais e subseqüentemente da delimitação das bacias de drenagem são provenientes da falta de informações sobre as localizações da rede de drenagem e lagos. Com o propósito de suprir essa deficiência, soluções são propostas considerando desde pequenas mudanças na elevação no pixel (Garbrecht & Martz, 1997; Mackay & Band, 1998) até a utilização de informações lineares de drenagens como dados complementares ao MDT. Esse último ajuste permite induzir o caminhamento da água e obter um modelo mais acurado da estrutura de drenagem e conseqüentemente uma melhor delimitação de sub-bacias (Tarboton, 1997).

Um procedimento para garantir a demarcação da rede de drenagem consiste em aprofundar a hidrografia no MDT, de forma a induzir a direção de fluxo ao longo dos canais. Essa metodologia pode ser subdividida nas seguintes etapas: (a) definição da rede de drenagem, (b) utilização de operações algébricas de mapa para o aprofundamento da rede de drenagem no MDT, e (c) cálculo da direção de fluxo.

A etapa de definição da rede de drenagem consiste em gerar uma imagem binária, onde a largura das drenagens seja de apenas uma célula. Essa característica facilita, posteriormente, os algoritmos de delimitação automática das sub-bacias. Normalmente, a simples conversão do vetor de drenagem para o formato raster não garante essa propriedade devendo utilizar-se de programas específicos. Dentre os algoritmos disponíveis para a delimitação automática da rede de drenagem pode-se citar o método TRACEGRID do programa ArcInfo. O TRACEGRID utiliza como dados de entrada: (a) os pontos de nascente para indicar o início da rede de drenagem, e (b) a grade de direção de fluxo, que demonstra o encaminhamento da água na superfície. Uma dificuldade desse processamento é a locação das nascentes (Vogt et al., 2003). As nascentes

podem ser obtidas pelo emprego do módulo Xtools do ArcGIS. Desta forma, no presente trabalho o emprego do Xtools obteve 1108 pontos de nascentes (**Figura 4A**) e complementarmente o uso do programa TRACEGRID obteve a imagem binária da rede de drenagem (**Figura 4B**).

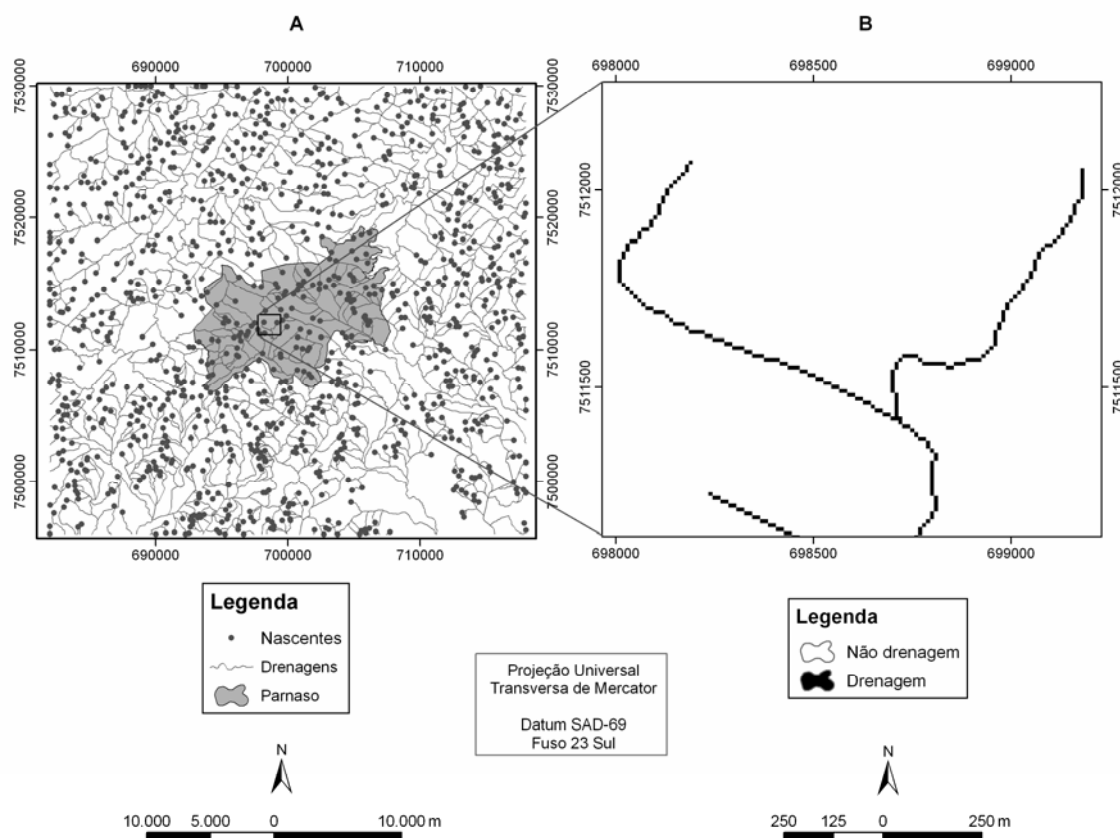


FIGURA 4 - (A) Pontos de nascentes obtidos a partir das drenagens no formato vetorial. (B) Detalhe da drenagem em formato de grade obtida pelo algoritmo TRACEGRID.

O aprofundamento da hidrografia pode ser obtido a partir de álgebras de mapas considerando o MDT e a grade binária da rede de drenagem. A obtenção do MDT com o aprofundamento da drenagem pode considerar três operações: (a) multiplicação da grade de hidrografia (área de drenagem com valor 1 (um) e as demais áreas com valores nulos) com o MDT subtraído do valor do rebaixamento em metros; (b) multiplicação da grade invertida de hidrografia (área de drenagem com valores nulos e as demais áreas com valor 1 [um]) com o MDT original; e (c) soma das duas grades anteriores (**Figura 5**). A grade resultante apresenta ao longo das drenagens valores extremamente baixos em relação às demais áreas

ao redor, gerando artificialmente uma feição de canyon. O valor constante de rebaixamento sugerido é que seja um número que mantenha os dados do MDT positivos, enquanto que a largura seja de 1 (uma) célula. No caso da imagem resultante apresentar algum valor negativo, deve-se acrescentar um valor, de modo que fique positivo. Para a área de estudo, o rebaixamento da drenagem foi de 30 metros. Devido à existência de áreas com cotas no nível do mar, o MDT gerado foi acrescido de 50 metros para manter valores positivos.

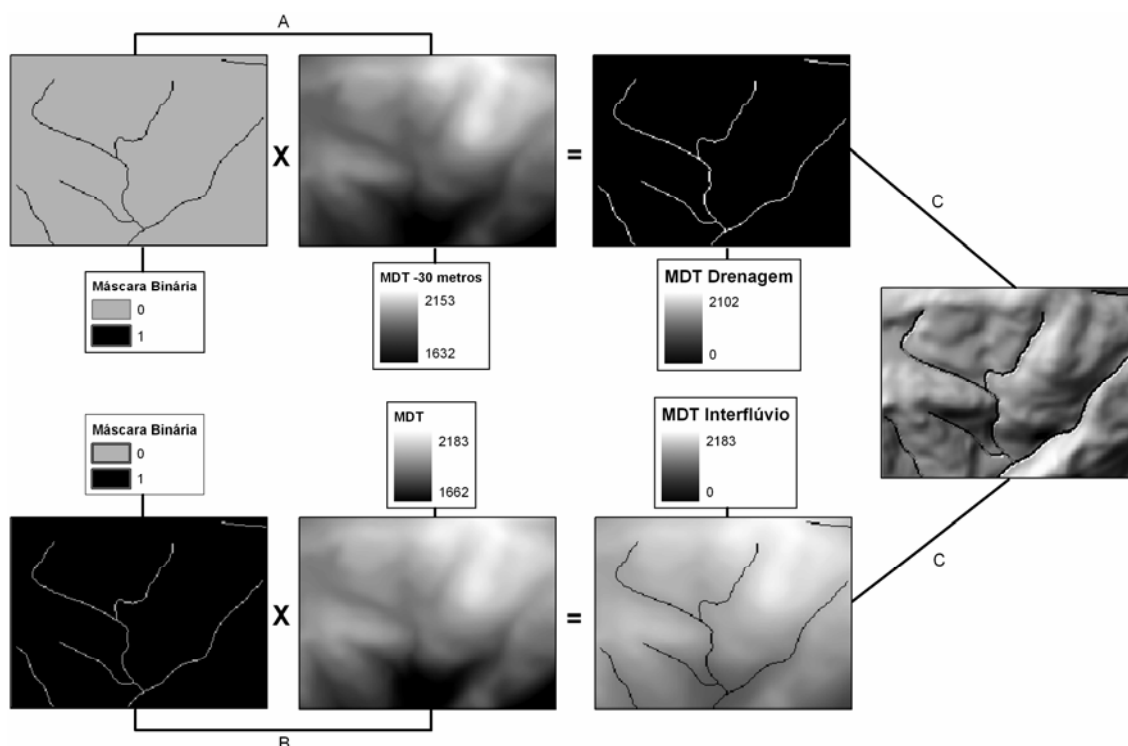


FIGURA 5 - Procedimentos para o aprofundamento da rede de drenagem (stream burning): (A) multiplicação da máscara binária da hidrografia com o MDT subtraído do valor do rebaixamento; (B) multiplicação da máscara da hidrografia invertida com o MDT original; e (C) soma das duas grades resultantes”.

Após o aprofundamento da drenagem, com o objetivo de manter a conectividade do fluxo ao longo do canal, realiza-se o preenchimento das depressões e o cálculo da direção de fluxo. A extração da direção de fluxo apenas ao longo do canal é obtida pela divisão com a imagem binária da área da drenagem (Tarboton, 2005) (**Figura 6**). No procedimento para o cálculo da direção de fluxo foi utilizado o método D8.

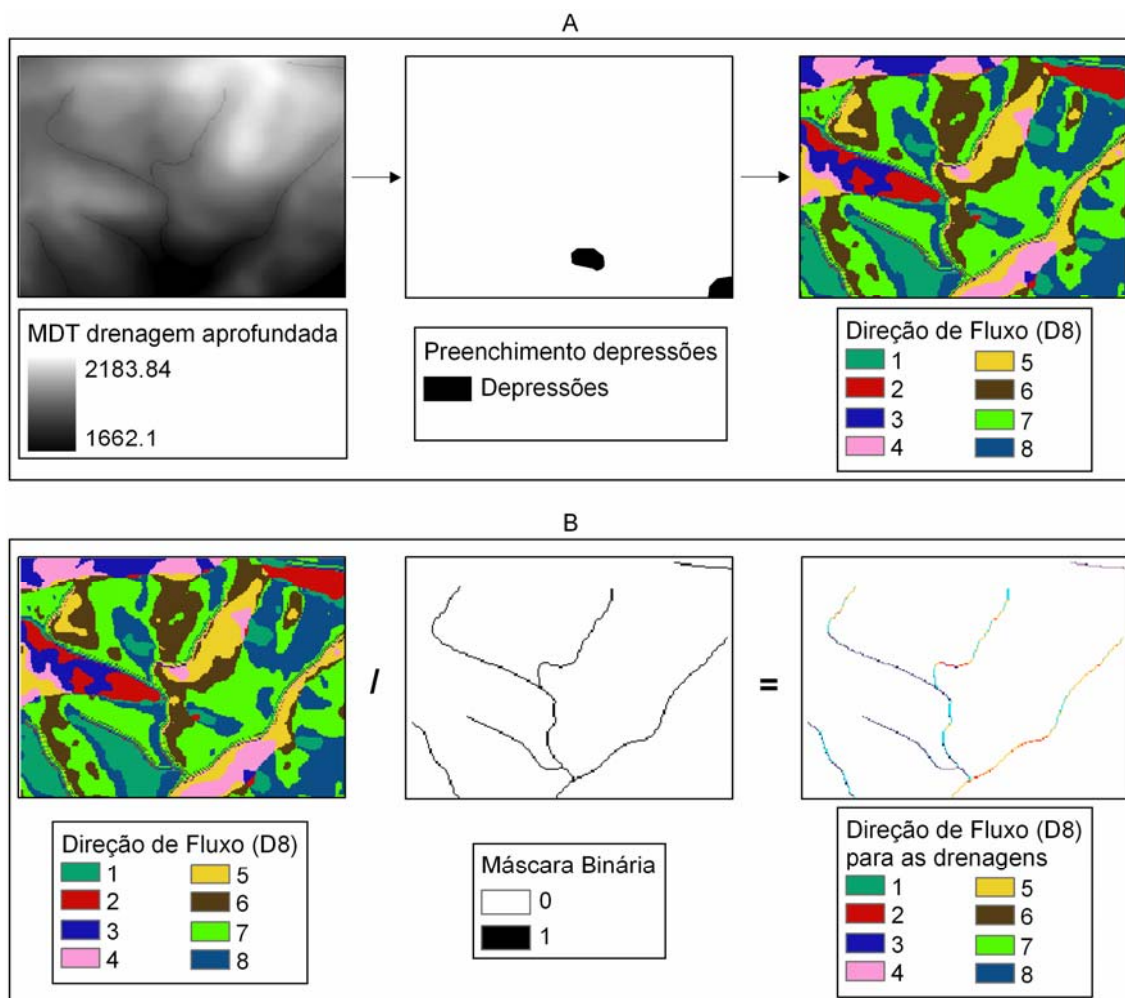


FIGURA 6 - Procedimentos para a obtenção da direção de fluxo ao longo dos canais de drenagens: (a) preenchimento das depressões do MDT com a drenagem aprofundada e obtenção da direção de fluxo do método D8; (b) divisão da grade de direção de fluxo pela máscara binária resultando na direção de fluxo do método D8 para as drenagens.

2.1.3 - Direção de Fluxo

O método D8 é o procedimento mais convencional para a delimitação da estrutura de drenagem. Esse procedimento determina a direção de fluxo de cada célula da grade considerando a maior declividade entre a célula central e as oito células circunvizinhas, sendo que o escoamento sempre ocorre para uma dessas oito células (O'Callaghan & Mark, 1984) (**Figura 7**).

O método D8 mostra-se adaptado para zonas de fluxo convergente e ao longo de vales definidos, contudo para outras situações salientam-se erros.

Assim, outros métodos são propostos considerando uma direção de fluxo não discreta ou um fluxo em múltipla direção (Tarboton, 1997; Costa-Cabral & Burges, 1994; Quinn et al., 1991). Esses procedimentos de fluxo não discretos apresentam quando comparados com o D8, um melhor ajuste dos erros provenientes da direção de fluxo e na delimitação do canal (Freeman, 1991; Desmet & Govers, 1996; Ramos et al. 2003).

No entanto, esses outros métodos apresentam como desvantagem eliminar a relação unimodal entre a direção do fluxo e a rede de drenagem, onde a transferência do fluxo é realizada de pixel para pixel. Portanto, na metodologia de aprofundamento da drenagem, cuja espessura é de apenas um pixel, o método D8 mostra-se o mais adequado.

Assim, para obter um melhor ajuste do modelo pode-se conjugar o método discreto D8 ao longo dos canais e não discretos, como o método D-infinito proposto por Tarboton (1997), nas demais partes do relevo.

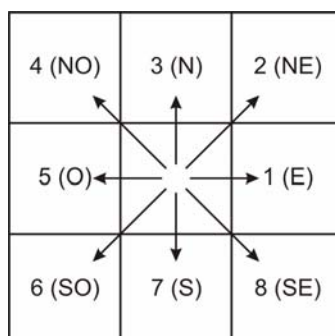


FIGURA 7 - Representação da direção de fluxo do método D8.

2.2 - Delimitação das bacias de drenagem

O limite da bacia obedece a parâmetros topográficos, onde se traça uma linha imaginária pelos pontos mais elevados do terreno, atravessando o curso d'água apenas no exutório (Christofolletti, 1980). O exutório pode ser demarcado na confluência de dois cursos d'água ou mesmo considerando especificações arbitrárias, como por exemplo, a barragem de uma hidrelétrica ou um ponto de captação de água para consumo em uma cidade. No entanto, alguns métodos de delimitações existentes das bacias de drenagem são realizados sem considerar um rigor geomorfológico, como é o caso do método por equidistância, onde o

divisor d'água se encontra na distância média entre os trechos da rede hidrográfica não avaliando as curvas de nível e pontos cotados. Um aperfeiçoamento para a delimitação das bacias de drenagem é obtido utilizando técnicas computacionais (Martz & Garbrecht, 1992, 1993; Martz & De Jong, 1988).

Um importante aspecto na delimitação das sub-bacias é definir o critério de subdivisão. O mais comum computacionalmente consiste na especificação de um tamanho de área (Band, 1986, 1989; Morris & Heerdegen, 1988; Chorowicz et al., 1992). No entanto, esse procedimento consiste em uma forma arbitrária, que não é padronizado. Uma alternativa é a utilização da hierarquização fluvial, cuja primeira proposição foi o método de Horton (1945). Posteriormente, Strahler (1952) propõe um novo modelo de ordenamento que se torna mais utilizado devido sua simplicidade e funcionalidade (Smart, 1968). Quatro passos constituem o procedimento de ordenação de Strahler: (1) canais que originados nas nascentes são definidos como canais de primeira ordem; (2) quando dois canais de ordem "x" se juntam, um canal de ordem "x+1" é criado; (3) quando dois canais de ordem diferentes se juntam o segmento do canal imediatamente à jusante adquire a mais alta ordem entre os dois canais; (4) a ordem da bacia é a mais alta ordem de canal presente.

Para a obtenção computacional das bacias de drenagem de Strahler pode ser utilizado o algoritmo Terrain Analysis Using Digital Elevation Models - TauDEM (Tarboton, 2005). Neste algoritmo os dados de entrada são: MDT e a grade da direção de fluxo pelo método D8 da rede de drenagem. A partir desses dois atributos o método TauDEM recalcula todos os demais atributos necessários para a delimitação da bacia incluindo: MDT preenchido e os atributos de terreno obtidos pelo método D8 e D-infinito (declividade, direção de fluxo e área de contribuição).

Desta forma, o método do TauDEM gera como resultados os segmentos de linha referentes às diferentes ordens fluviais. A **Figura 8** demonstra as redes de drenagem de 1^a, 2^a, 3^a e 4^a ordens para a área de estudo.

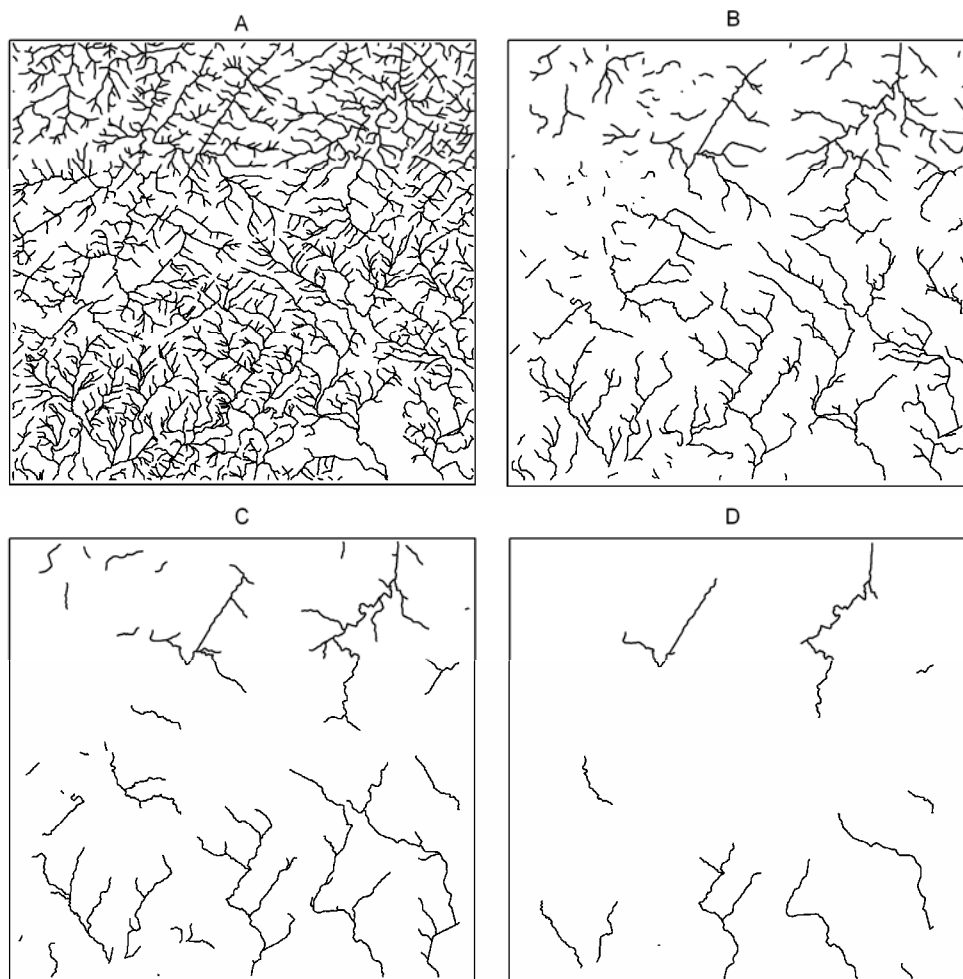


FIGURA 8 - Segmentos da rede de drenagem obtidos para delimitar as bacias de: 1ª ordem (A); 2ª ordem (B); 3ª ordem (C) e 4ª ordem (D).

A delimitação automática das bacias de drenagem baseia-se nos segmentos das linhas das drenagens compatíveis com a hierarquia fluvial, gerando um polígono para cada segmento. Desta forma, o método permite individualizar as bacias de ordem desejada (**Figura 9A**) e eventualmente na existência de áreas não classificadas gera fragmentos, demarcados pelo exutório de duas bacias de mesma ordem (**Figura 9B**).

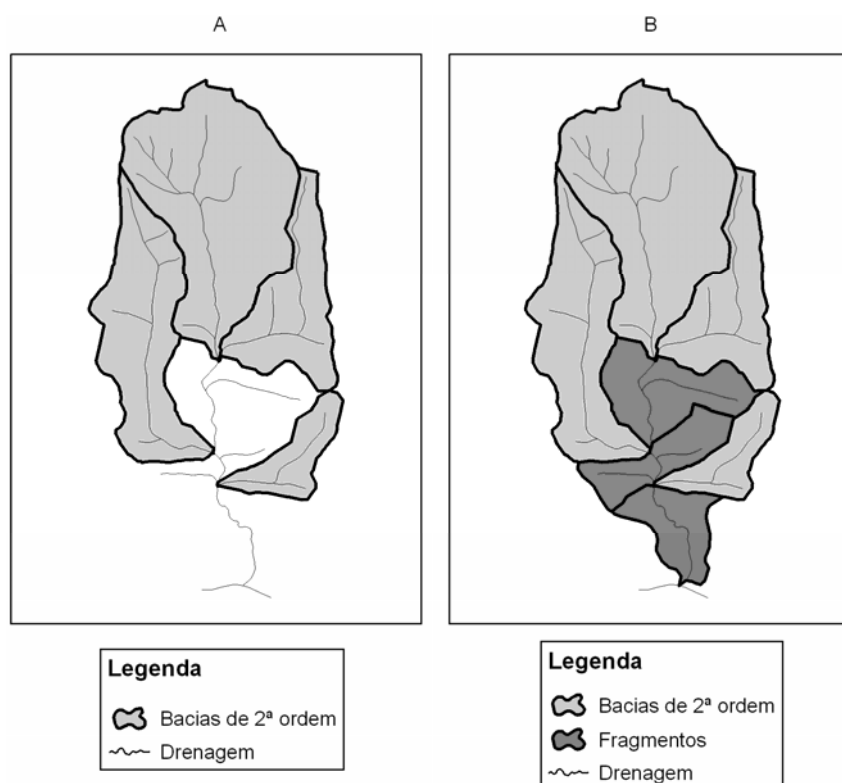


FIGURA 9 - Bacias de 2ª ordem da hierarquia de Strahler (A). Bacias de 2ª ordem da hierarquia de Strahler mais fragmentos (B).

2.3 - Cálculo dos atributos morfométricos das bacias de drenagem

A tendência de a superfície organizar-se em bacias de drenagem pode ter como fator dominante o princípio da minimização da energia. A conformação das bacias de drenagem é espacialmente modelada pela difusão e incisão dos processos erosivos, de forma que a perda de energia seja minimizada, tanto no transporte de água como no processo modelador da paisagem (Langbein, 1964; Langbein & Leopold, 1964; Montgomery & Dietrich, 1992; Rodriguez-Iturbe et al., 1992a,b). Portanto, os dados de morfometria de uma bacia permitem indicar os processos atuantes e o funcionamento do seu modelado.

Desta forma, as características morfométricas das bacias e sub-bacias em diferentes localidades têm sido correlacionadas com fatores e propriedades ambientais (permeabilidade, enchentes, processos de erosão e movimento de massa, substrato rochoso, evolução pedológica, entre outros) (Reddy et al., 2004; Vilela & Matos, 1975). Esses parâmetros também ajudam a entender o processo

de ocupação antrópica e auxilia no planejamento do manejo da bacia (Cardoso et al. 2006; Demattê & Demétrio, 1995; Mesa, 2006; Souza & Batista, 2007).

A espacialização das feições morfométricas por unidades de bacia de drenagem pode trazer uma perspectiva integradora dos diversos fatores que atuam sobre o modelado como geologia, clima, fatores antrópicos, entre outros. Numerosos parâmetros foram formulados para a análise e a descrição quantitativa da bacia de drenagem, considerando tanto atributos lineares e areais como referente aos atributos do relevo. Desta forma, existem vários índices e razões geométricas que são empregados na descrição dessa unidade ambiental.

No presente trabalho, utilizam-se tanto parâmetros básicos referentes à bacia como provenientes de índices. A análise considerou tanto as bacias como também as bacias somadas de fragmentos de forma a comparar essas duas representações. Dentre os parâmetros básicos na caracterização das sub-bacias foram utilizados: área (A), perímetro (P), altura máxima e mínima (M, m) e declividade média (Decl). Além desses, foram utilizadas informações provenientes de índices como amplitude topográfica (AT) e índice de circularidade (IC), como também é sugerido o desvio padrão dos dados de altitude como novo parâmetro.

Algoritmos para a determinação de alguns parâmetros morfométricos utilizados (altitude mínima, máxima, média, amplitude, declividade média e desvio padrão) foram elaborados para esse trabalho em linguagem C.

2.3.1 - Amplitude Topográfica

A amplitude topográfica da bacia (AT) consiste na diferença da elevação entre a altitude topográfica máxima (M) em relação à mínima (m), sendo expressa por:

$$AT = M - m$$

Esse parâmetro representa o gradiente da bacia de drenagem, e conseqüentemente fornece indicações sobre o padrão de fluxo e a importância de sedimentos transportados (Hadley & Schumm 1961). Meis et al. (1982) e posteriormente Silva (2002; 2005) utilizam a amplitude topográfica como um atributo para a classificação de unidades geomorfológicas da região do Planalto Atlântico do Sudeste do Brasil. Nesses estudos é proposto o uso de bacias de

drenagem de até segunda ordem fluvial de Strahler, por estes canais constituírem os de maior poder erosivo das encostas e, portanto, evidenciar padrões geomorfológicos distintos.

2.3.2 - Desvio Padrão dos Dados Altimétricos

Christofolletti (1980) salienta que uma dificuldade do emprego da amplitude topográfica é uma eventual baixa representatividade areal dos valores extremos. Assim, a cota máxima pode estar restrita a um ponto excepcional na bacia que encobertaria o real significado da movimentação topográfica. Para evitar essa interferência é proposto no presente trabalho o emprego das medidas de dispersão da altimetria. Esses parâmetros permitem uma melhor caracterização da variação dos dados altimétricos e conseqüentemente uma melhor caracterização do gradiente na bacia. A variância mede a dispersão dos dados em torno da média podendo ser expressa como a soma dos quadrados dos desvios dividida pelo número de células.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

O desvio padrão é a raiz quadrada da variância, possuindo como vantagem apresentar uma unidade de medida igual à dos dados. No programa elaborado neste trabalho foi desenvolvido um módulo que realiza em conjunto o cálculo da altimetria máxima e mínima, amplitude topográfica, variância e desvio padrão. Este módulo utiliza como informações de entrada a grade das bacias de drenagem e o MDT.

2.3.3 - Índices de Forma

O índice de circularidade (IC) é a razão entre a área da bacia (A) e a área de um círculo com o mesmo perímetro da bacia (P) (Miller, 1953; Strahler, 1964), sendo expresso por:

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Onde "IC" é a circularidade da bacia, "P" é o perímetro da bacia e "A" é a área da bacia. Nesta formulação o valor máximo é igual a 1 (um), quando corresponde

a uma bacia com forma circular ideal. Desta forma, quanto mais próximo de 1 (um) for o valor, maior circularidade possui a bacia. A circularidade da bacia apresenta influência direta na distribuição do hidrograma de vazão no exutório da bacia.

Em um evento de chuva, as bacias com formato alongado apresentam fluxos de água que atingem o exutório em diferentes tempos conforme o seu posicionamento na bacia. Os fluxos iniciados nas cabeceiras da bacia apresentam um longo trajeto até o exutório e conseqüentemente maior tempo de chegada, enquanto que as nascentes próximas atingem rapidamente o exutório. O formato dos hidrogramas dessas bacias apresenta uma forma achatada. Em contraposição, em uma bacia circular todas as nascentes ficam aproximadamente eqüidistantes do exutório permitindo uma chegada concomitante que provoca um pico no hidrograma.

2.4 - Análise estatística multivariada dos atributos das bacias de drenagem

Para realizar uma investigação das inter-relações entre as bacias de drenagem devem ser adotados procedimentos estatísticos multivariados devido ao volume de dados gerados. As técnicas de análise multivariada permitem simplificar e organizar o montante de dados levantados. Dentre os métodos aplicados no estudo de morfometria de bacias de drenagem destacam-se a análise de grupos e a análise de principais componentes (APC) (Mather & Doornkamp, 1970).

A utilização da Análise de Grupos vem sendo cada vez mais empregada como uma importante ferramenta na investigação científica, contribuindo significativamente para formulação de sistemas de classificação. Este método estatístico favorece a formulação de hipóteses sobre a estrutura da distribuição interna dos dados. Desta forma, a análise de grupos tem como propósito particionar um conjunto de N entidades (no nosso caso os dados morfométricos) em subconjuntos distintos e não vazios, que sejam tão homogêneos quanto possível. A classificação dos grupos é definida por intermédio de uma medida de similaridade ou dissimilaridade, como por exemplo o coeficiente de correlação ou a distância Euclidiana. No final do processo objetiva-se definir grupos que sejam decorrentes da própria estruturação dos dados.

Os métodos de análise de grupamento podem ser subdivididos em métodos hierárquicos e não-hierárquicos (Hair et al., 1987). Os procedimentos hierárquicos geram estruturas do tipo árvore, onde inicialmente cada elemento é um grupo e a cada passo, os dois grupos mais próximos são aglomerados. As metodologias hierárquicas têm como limitação o maior tempo computacional despendido com o aumento do número de amostras e parâmetros.

Os métodos não hierárquicos são apropriados para a classificação de conjuntos de elementos superiores a 1000 pela portabilidade computacional. Nesse procedimento, primeiramente, são selecionados centros para os agrupamentos denominados sementes que, a partir de uma distância pré-determinada, agrupa os elementos em sua volta. Dentre os procedimentos não hierárquicos, o método mais comumente usado é o K-means.

No presente trabalho foi utilizado o método K-means para as bacias de 1^a, 2^a e 3^a ordem e também o método hierárquico aglomerativo apenas para a bacia de 3^a ordem devido ao número de amostras. Tendo em vista a variedade de medidas presentes nos atributos morfométricos os dados foram normalizados pela amplitude. Desta forma, todos os atributos passaram a variar entre 0 (zero) até 1 (um).

A APC pode ser sumarizada em três passos (Richards, 1986): derivação da matriz de correlação ou de variância-covariância, (b) cálculo dos autovetores e autovalores, e (c) transformação linear do conjunto de dados. A APC estabelece um novo sistema de coordenadas, onde os novos eixos maximizam a variabilidade dos dados. Assim na nova projeção a maior variabilidade repousa no primeiro eixo, a segunda maior no segundo eixo e assim sucessivamente. Esse método transforma o conjunto de variáveis por uma combinação linear em atributos descorrelacionados e ordenados de forma a reduzir a variabilidade. A redução da dimensionalidade permite uma descrição compacta e otimizada do conjunto de dados. Como os eixos são ortogonais entre si não existe informação redundante.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 - Resultados das bacias de drenagem e dos dados de morfometria

A interpolação das curvas de níveis, pontos cotados e drenagens permitiu a obtenção do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo, com resolução espacial de 10 metros (**Figura 10**). A partir do MDT foi obtido o mapa de declividade (**Figura 11**). Esses dados foram utilizados na obtenção das métricas das bacias de drenagem.

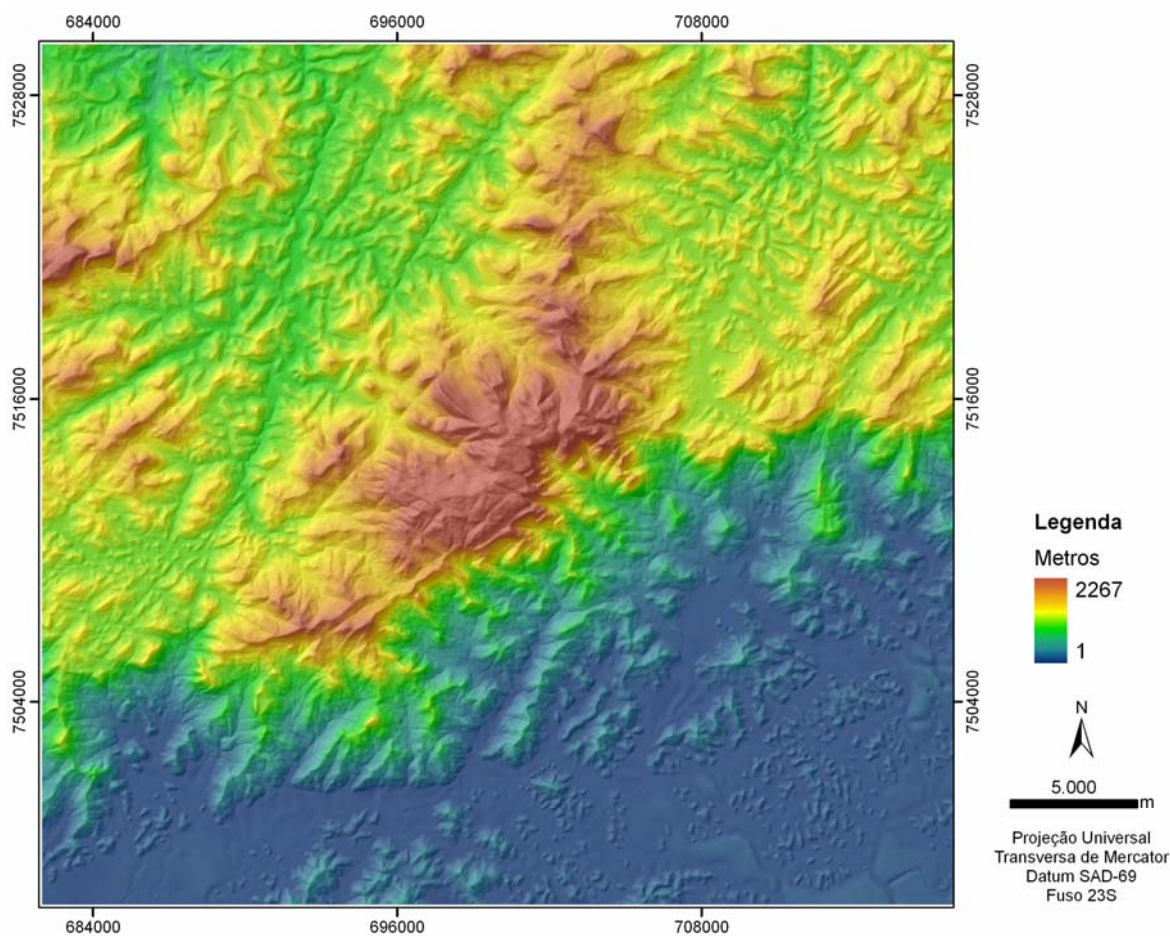


FIGURA 10 - Modelo Digital de Terreno (MDT).

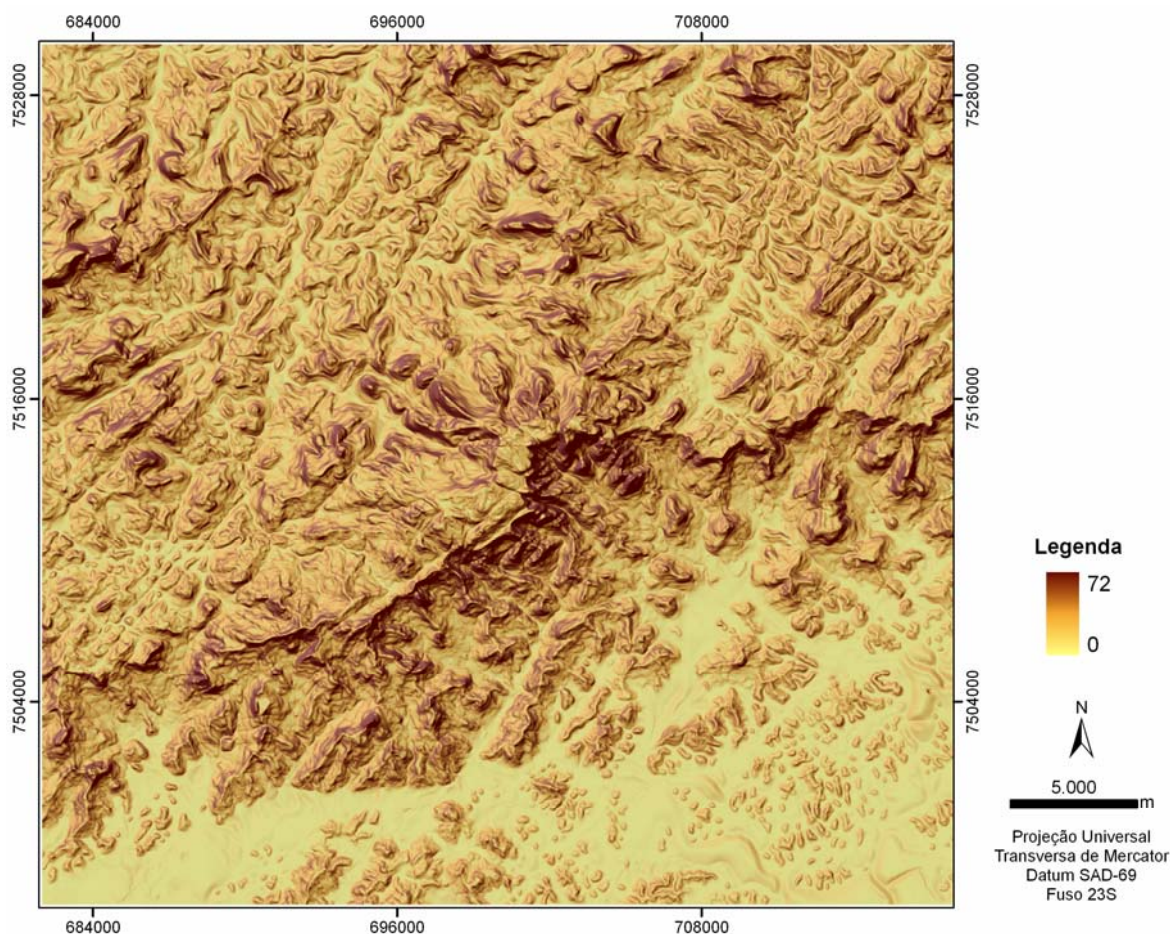


FIGURA 11 - Mapa de declividade.

O emprego da metodologia automatizada para detecção de bacias hidrográficas permitiu individualizar para a área de estudo as bacias de 1^a, 2^a, 3^a e 4^a ordem fluvial (**Figuras 12 e 14**) e das bacias de 1^a, 2^a, 3^a e 4^a ordem fluvial mais fragmentos (**Figuras 13 e 15**). Assim, foram obtidas 816 bacias referentes à 1^a ordem e 1587 bacias de 1^a ordem mais fragmentos; 195 bacias de 2^a ordem e 425 bacias de 2^a ordem mais fragmentos; 63 bacias de 3^a ordem e 105 bacias de 3^a ordem mais fragmentos; 16 bacias de 4^a ordem e 21 bacias de 4^a ordem mais fragmentos.

Os dados morfométricos foram obtidos para os dois padrões de bacias: só a ordem analisada (**Figuras 12 e 14**) e ordem analisada mais fragmentos (**Figuras 13 e 15**). Esse procedimento foi adotado para verificar se a baixa representatividade areal das bacias que possuem só a ordem analisada permite a obtenção de compartimentos de relevo e também para verificar se a

fragmentação do restante da área com polígonos que não faz parte da ordem analisada permite a complementação das áreas sem informação.

A análise de bacias de drenagem de diferentes ordens permite estabelecer uma relação escalar, onde se observa variações locais para bacias de primeira ordem e variações cada vez mais regionais para bacias de ordens maiores. Nas **Figuras 12, 13, 14 e 15** pode-se notar uma orientação distinta entre as bacias: algumas estão orientadas para NNW, enquanto outras orientam-se para SSE. Esta observação pode ser constatada por mudanças dos padrões morfométricos provenientes das formas espaciais e das agregações dos dados. Tais mudanças podem ser detectadas conforme o posicionamento espacial da bacia na paisagem.

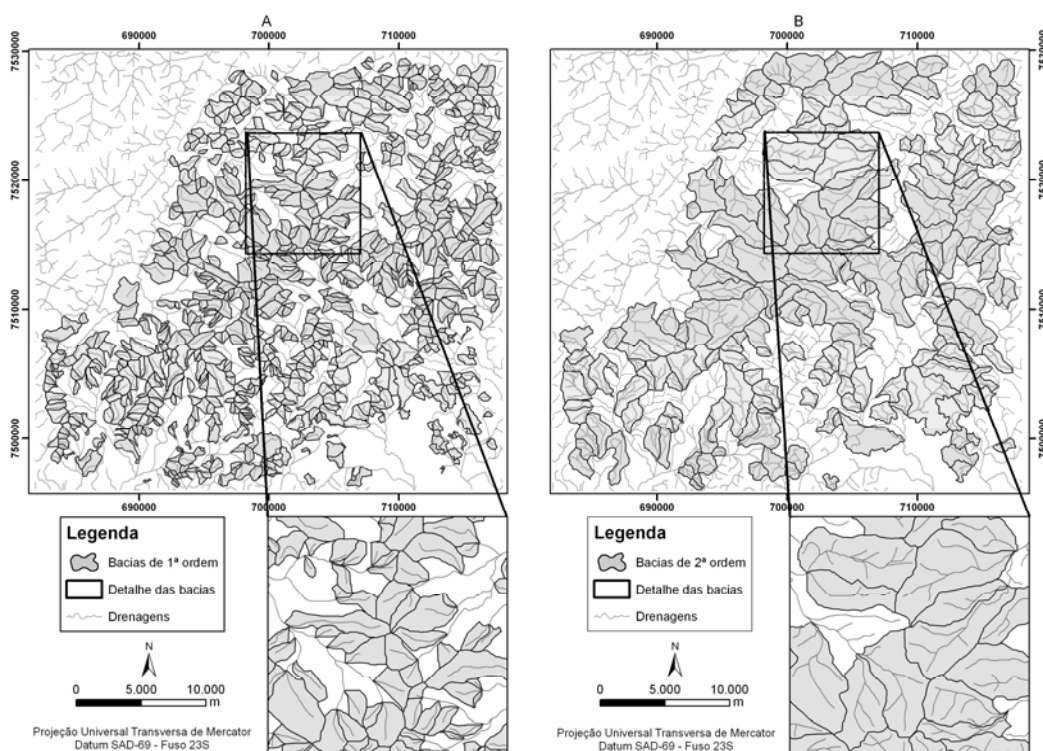


FIGURA 12 - Bacias de 1ª ordem (A) e bacias de 2ª ordem (B) apenas para as ordens analisadas.

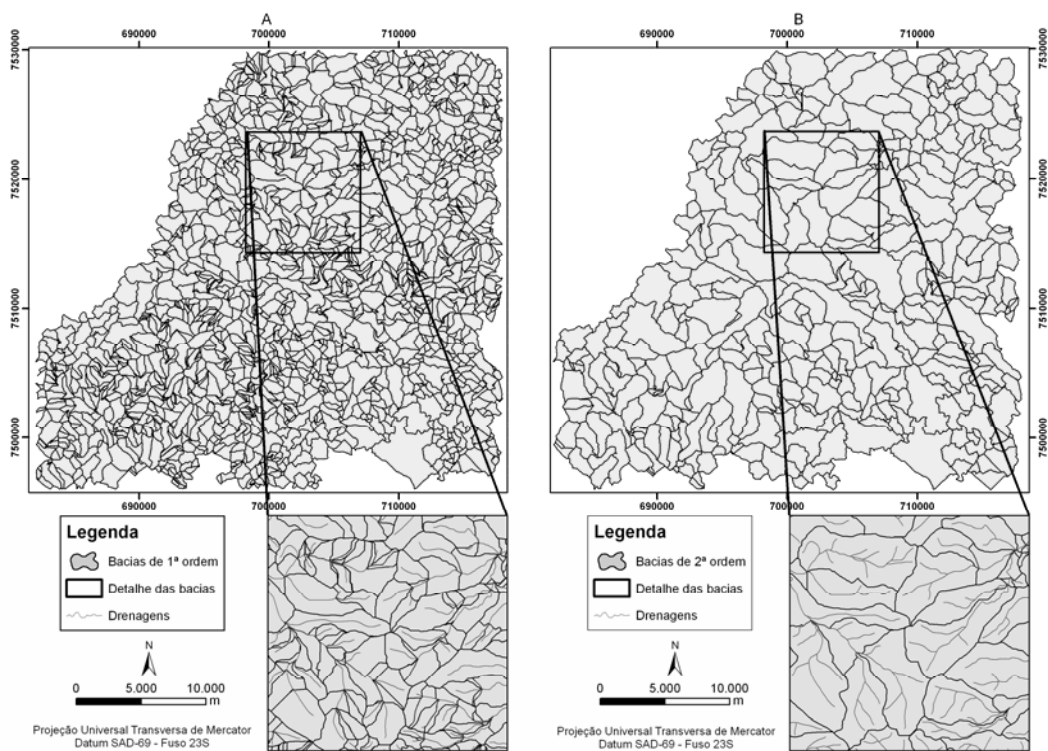


FIGURA 13 - Bacias de 1ª ordem (A) e bacias de 2ª ordem (B) mais a fragmentação de toda área de estudo.

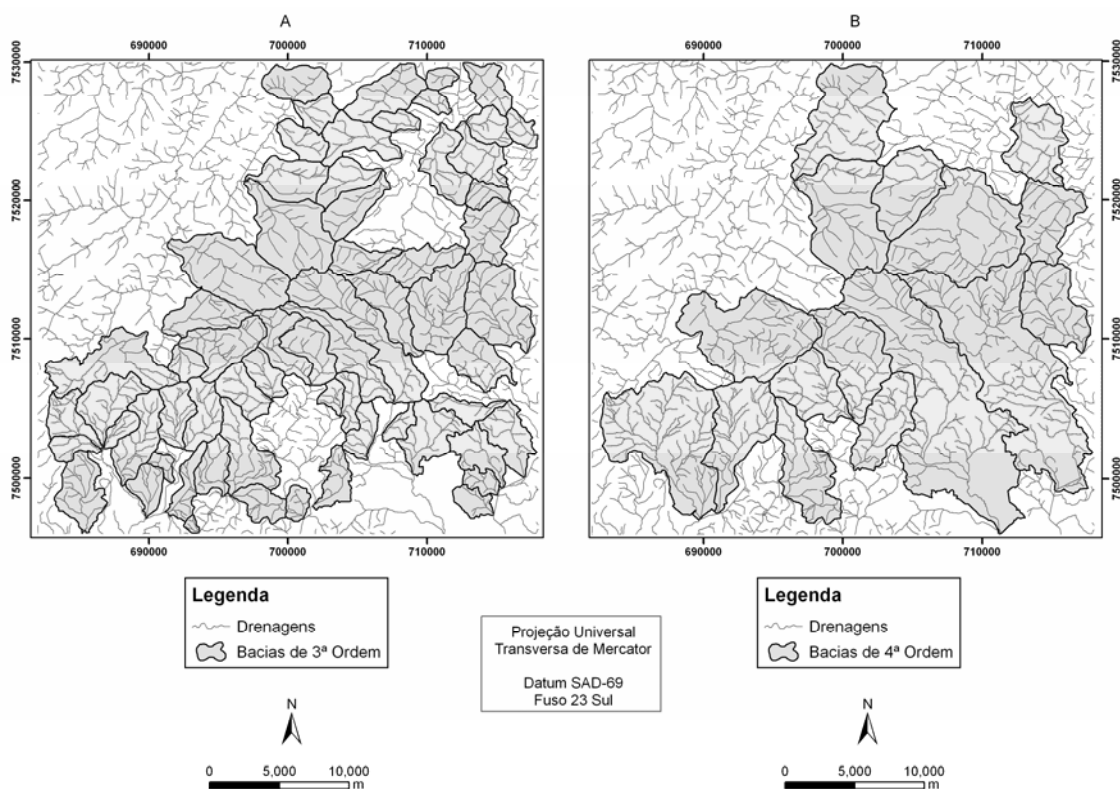


FIGURA 14 - Bacias de 3ª ordem (A) e bacias de 4ª ordem (B) apenas para as ordens analisadas.

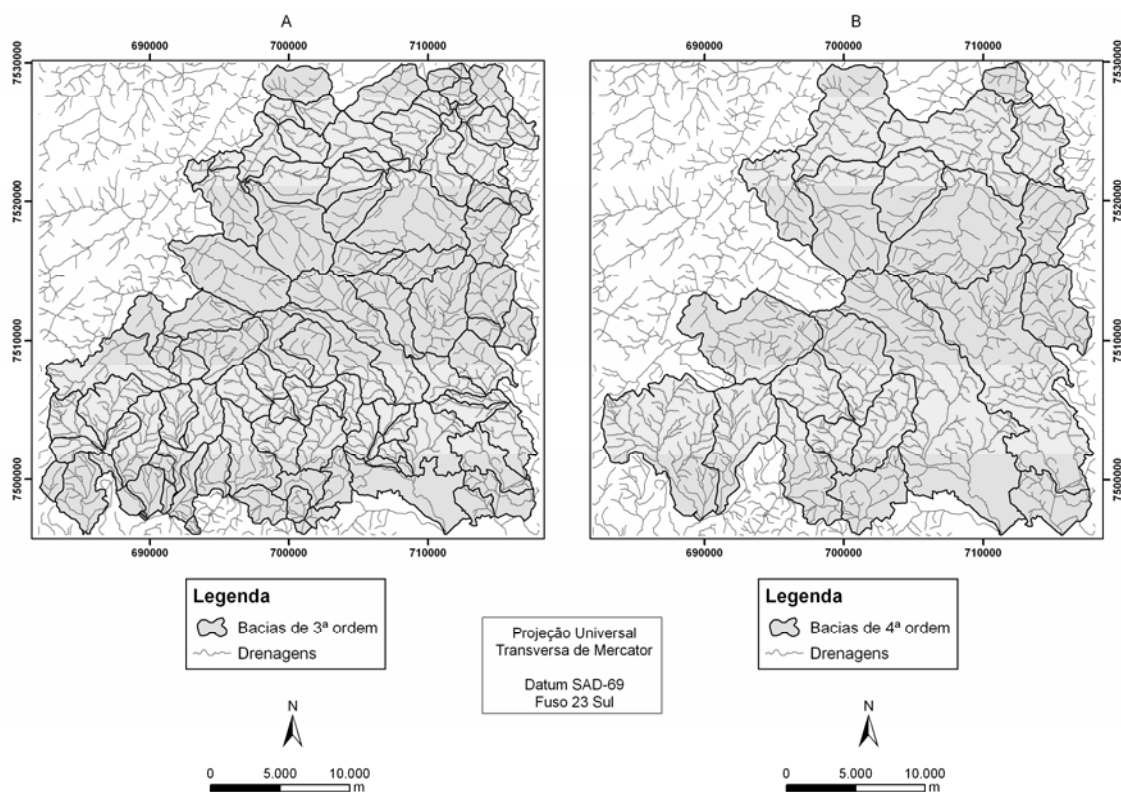


FIGURA 15 - Bacias de 3ª ordem (A) e bacias de 4ª ordem (B) mais a fragmentação de toda área de estudo.

Os parâmetros morfométricos de altimetria mínima, máxima e média das bacias de drenagem demonstram uma alta correlação entre si para as ordens fluviais analisadas (**Tabelas 1, 2 e 3**). Estes atributos morfométricos para as bacias de 3ª ordem permitem individualizar claramente dois segmentos referentes a faixa litorânea das áreas continentais, onde o limite é demarcado pelo divisor de águas da Serra do Mar com direção WSW-ENE (**Figuras 16, 17 e 18**). Com a diminuição da ordem fluvial individualiza-se um conjunto de bacias com altitudes médias elevadas na parte central da área de estudo, condizente com o topo da Serra dos Órgãos. Outro conjunto de bacias é individualizado na vertente voltada para o oceano, que representa a Escarpa da Serra dos Órgãos.

Os dados morfométricos referentes à amplitude, desvio padrão e declividade média salientam as características de variação interna da altimetria e possuem entre si uma alta correlação em todas as ordens fluviais analisadas (**Tabelas 1, 2 e 3**). Estes parâmetros salientam o desnível abrupto das bacias de drenagem posicionadas ao longo da escarpa onde constata-se elevados gradientes topográficos (com desníveis que ultrapassam 2.000 m) (**Figuras 19, 20**

e 21). Considerando as bacias de 3ª ordem os desníveis mais acentuados ocorrem nas bacias do Rio Soberbo, Rio Bananal e Córrego Sossego (manchas em marrom nas **Figuras 20A e 20B**). Essas bacias junto as Escarpas Serranas evoluem a partir de uma frente de dissecação de bloco falhado fortemente relacionado com os condicionantes estruturais provenientes das fraturas e falhas (**Figura 22**), onde ocorrem com frequência os movimentos de massa.

Os parâmetros morfométricos de área e perímetro também apresentam alta correlação (**Tabelas 1, 2 e 3**), sendo que a presença dos fragmentos de bacias interferem nos padrões obtidos. O comportamento desses parâmetros apresentam uma intensa variação com mudanças significativas dos padrões nas diferentes ordens fluviais (**Figuras 23 e 24**). Observa-se que para as bacias onde se considera apenas a ordem desejada, o valor mais alto na 3ª ordem fluvial é a bacia do rio Soberbo junto à escarpa (mancha em marrom na **Figura 24A**), enquanto que para as bacias de 1ª ordem os valores mais altos são distribuídos em várias bacias espalhadas pela área de estudo (**Figura 24C**), não sendo possível identificar as áreas planas. Nas bacias onde se considera a ordem analisada mais fragmentos, o valor mais alto na 3ª ordem fluvial inclui a bacia do rio Soberbo junto à escarpa (mancha em marrom na **Figura 24A**) e uma bacia na região de planície, enquanto que para as bacias de 1ª ordem o valor mais alto se restringe à região de planície.

O índice de circularidade não apresenta correlação significativa com nenhum outro parâmetro (**Tabela 1, 2 e 3**). No entanto, observa-se para as bacias de diferentes ordens fluviais que há um predomínio de valores menores do índice nas bacias localizadas a SSE e que estão direcionadas para o litoral (**Figuras 25A e 25D**). Em contraposição as bacias direcionadas para o continente apresentam formas mais circulares. Assim, através desse índice pode-se notar a subdivisão, anteriormente observada, entre as bacias que ocorrem de um lado e de outro da escarpa serrana.

TABELA 1 - Matriz de correlação dos parâmetros morfométricos para as bacias de 1ª ordem mais fragmentos

	Mínimo	Máximo	Média	Amplitude	Desv. Padrão	Decl. Média	Perímetro	Área	IC
Mínimo	1.00	0.91	0.98	0.29	0.29	0.45	-0.03	0.00	0.17
Máximo	0.91	1.00	0.97	0.65	0.64	0.68	0.15	0.13	0.12
Média	0.98	0.97	1.00	0.47	0.47	0.59	0.04	0.05	0.16
Amplitude	0.29	0.65	0.47	1.00	0.97	0.76	0.42	0.29	-0.02
Desv. Padrão	0.29	0.64	0.47	0.97	1.00	0.80	0.36	0.24	-0.01
Decl. Média	0.45	0.68	0.59	0.76	0.80	1.00	0.06	0.01	0.16
Perímetro	-0.03	0.15	0.04	0.42	0.36	0.06	1.00	0.91	-0.12
Área	0.00	0.13	0.05	0.29	0.24	0.01	0.91	1.00	0.05
IC	0.17	0.12	0.16	-0.02	-0.01	0.16	-0.12	0.05	1.00

TABELA 2 - Matriz de correlação dos parâmetros morfométricos para as bacias de 2ª ordem mais fragmentos

	Mínimo	Máximo	Média	Amplitude	Desv. Padrão	Decl. Média	Perímetro	Área	IC
Mínimo	1.00	0.81	0.94	0.25	0.23	0.46	0.06	0.12	0.17
Máximo	0.81	1.00	0.95	0.76	0.74	0.76	0.38	0.40	0.06
Média	0.94	0.95	1.00	0.53	0.52	0.65	0.20	0.24	0.13
Amplitude	0.25	0.76	0.53	1.00	0.97	0.76	0.56	0.53	-0.09
Desv. Padrão	0.23	0.74	0.52	0.97	1.00	0.77	0.51	0.48	-0.07
Decl. Média	0.46	0.76	0.65	0.76	0.77	1.00	0.19	0.19	0.18
Perímetro	0.06	0.38	0.20	0.56	0.51	0.19	1.00	0.94	-0.30
Área	0.12	0.40	0.24	0.53	0.48	0.19	0.94	1.00	-0.13
IC	0.17	0.06	0.13	-0.09	-0.07	0.18	-0.30	-0.13	1.00

TABELA 3 - Matriz de correlação dos parâmetros morfométricos para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos

	Mínimo	Máximo	Média	Amplitude	Desv. Padrão	Decl. Média	Perímetro	Área	IC
Mínimo	1.00	0.65	0.89	0.11	0.04	0.48	0.00	0.12	0.32
Máximo	0.65	1.00	0.90	0.83	0.76	0.84	0.43	0.53	0.12
Média	0.89	0.90	1.00	0.52	0.47	0.73	0.20	0.32	0.26
Amplitude	0.11	0.83	0.52	1.00	0.96	0.75	0.57	0.60	-0.08
Desv. Padrão	0.04	0.76	0.47	0.96	1.00	0.69	0.52	0.54	-0.10
Decl. Média	0.48	0.84	0.73	0.75	0.69	1.00	0.21	0.29	0.33
Perímetro	0.00	0.43	0.20	0.57	0.52	0.21	1.00	0.92	-0.57
Área	0.12	0.53	0.32	0.60	0.54	0.29	0.92	1.00	-0.32
IC	0.32	0.12	0.26	-0.08	-0.10	0.33	-0.57	-0.32	1.00

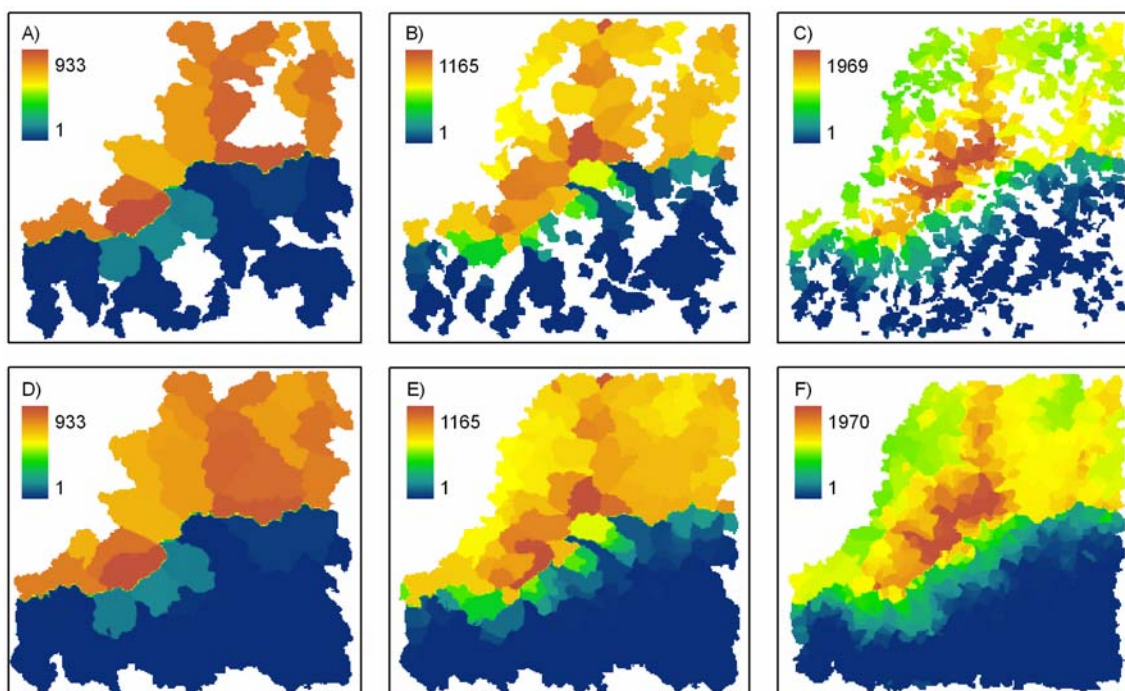


FIGURA 16 - Altitude mínima para as bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C). Altitude mínima para as bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).

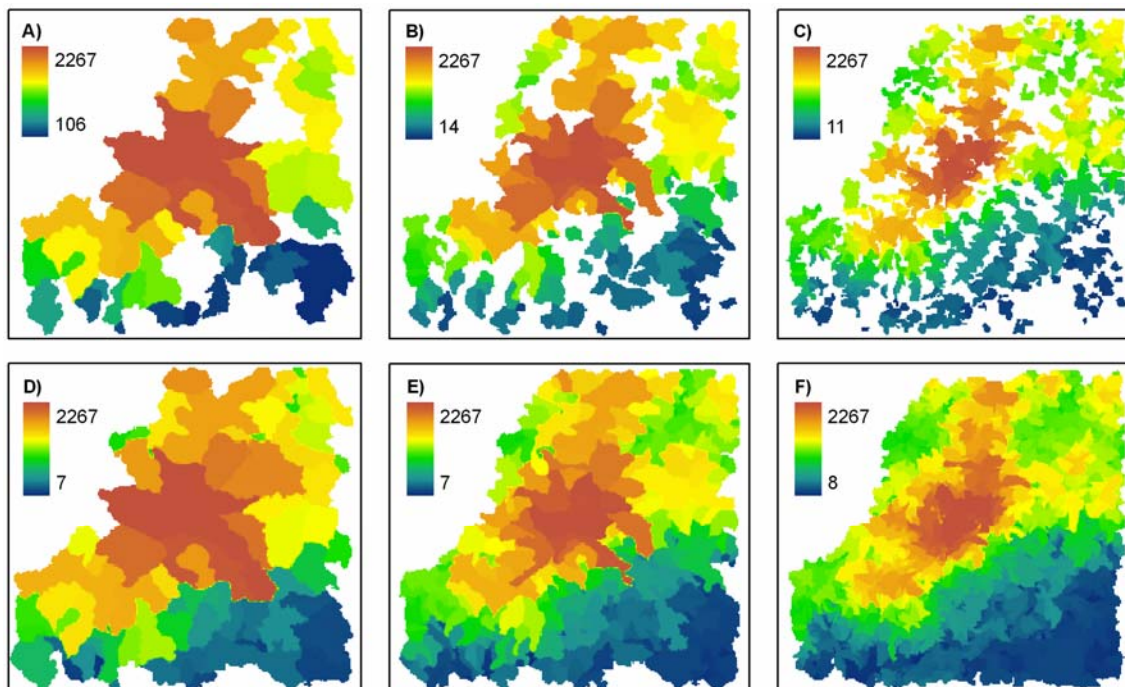


FIGURA 17 - Altitude máxima para as bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C). Altitude máxima para as bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).

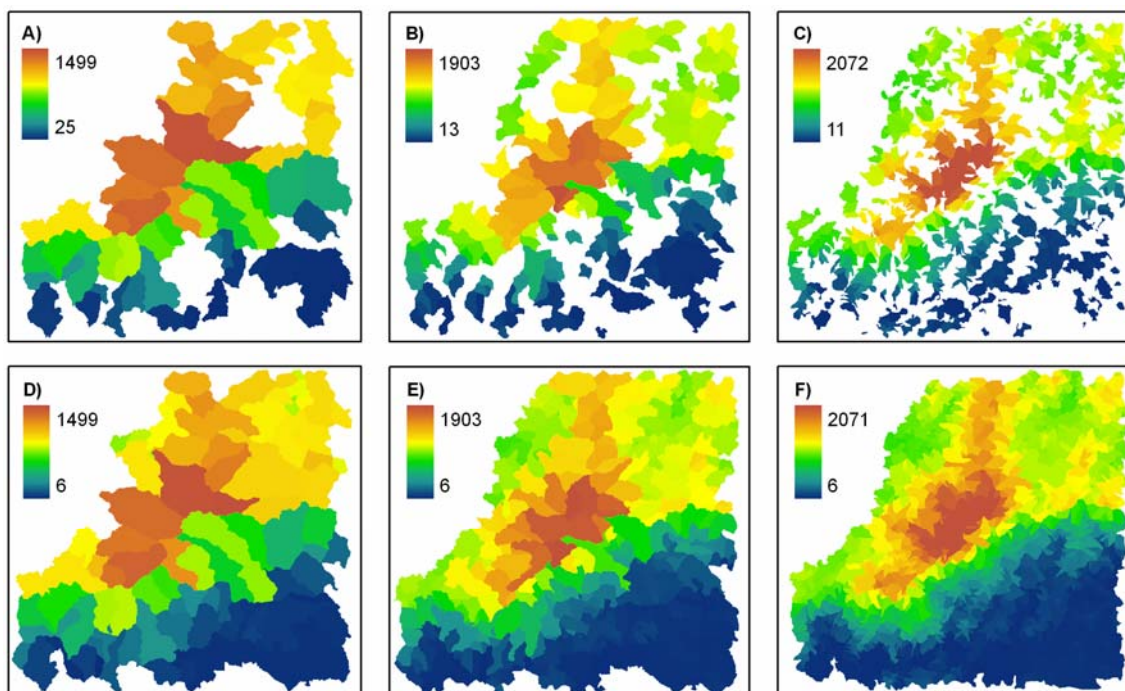


FIGURA 18 - Altitude média para as bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C). Altitude média para as bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).

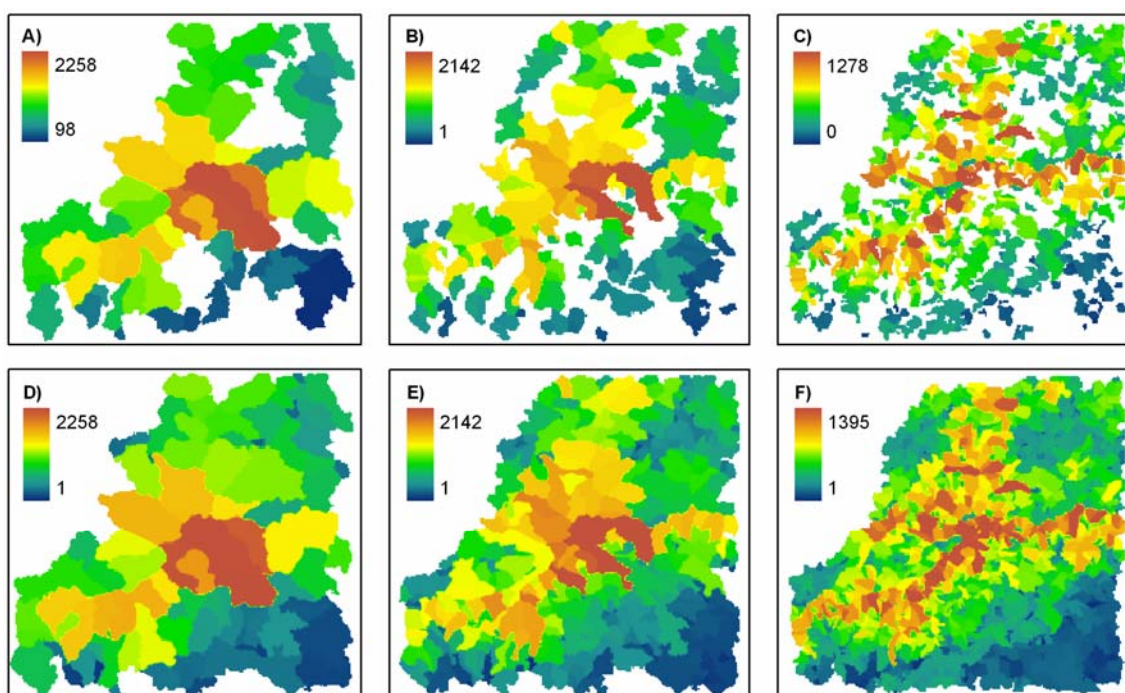


FIGURA 19 - Amplitude topográfica para as bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C). Amplitude topográfica para as bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).

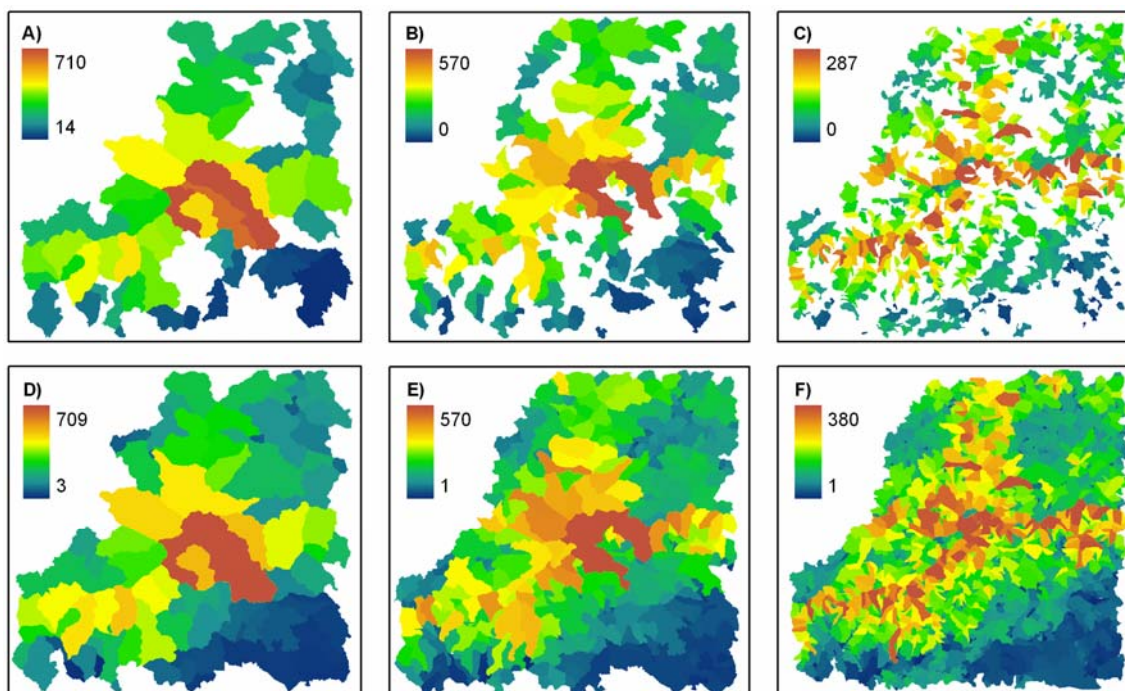


FIGURA 20 - Desvio padrão para as bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C). Desvio padrão para as bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).

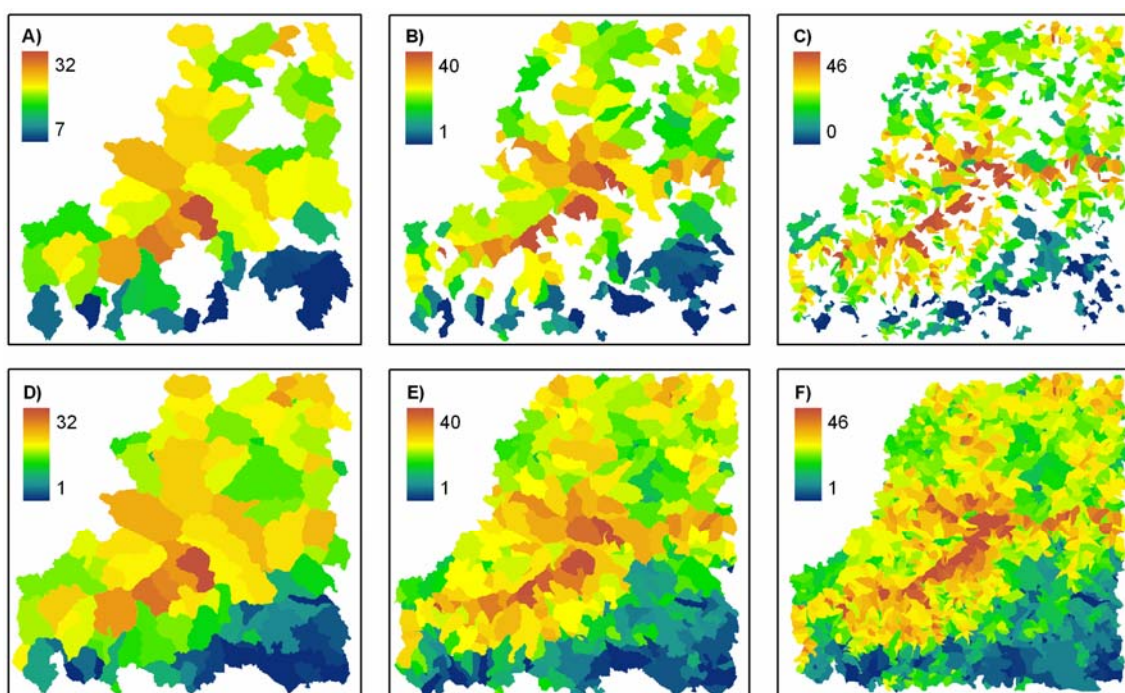


FIGURA 21 - Declividade média para as bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C). Declividade média para as bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).

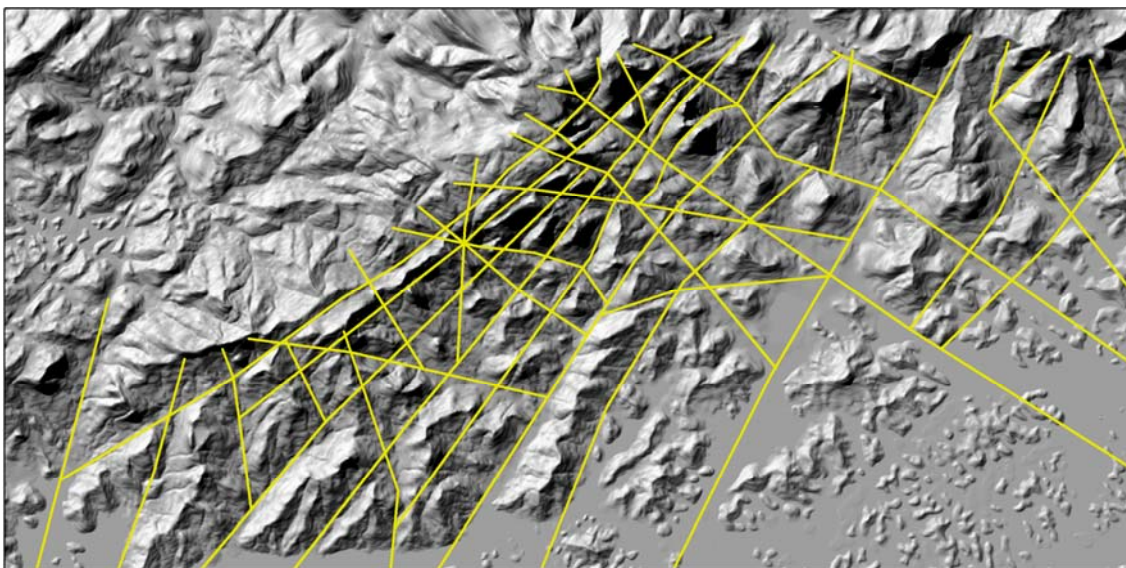
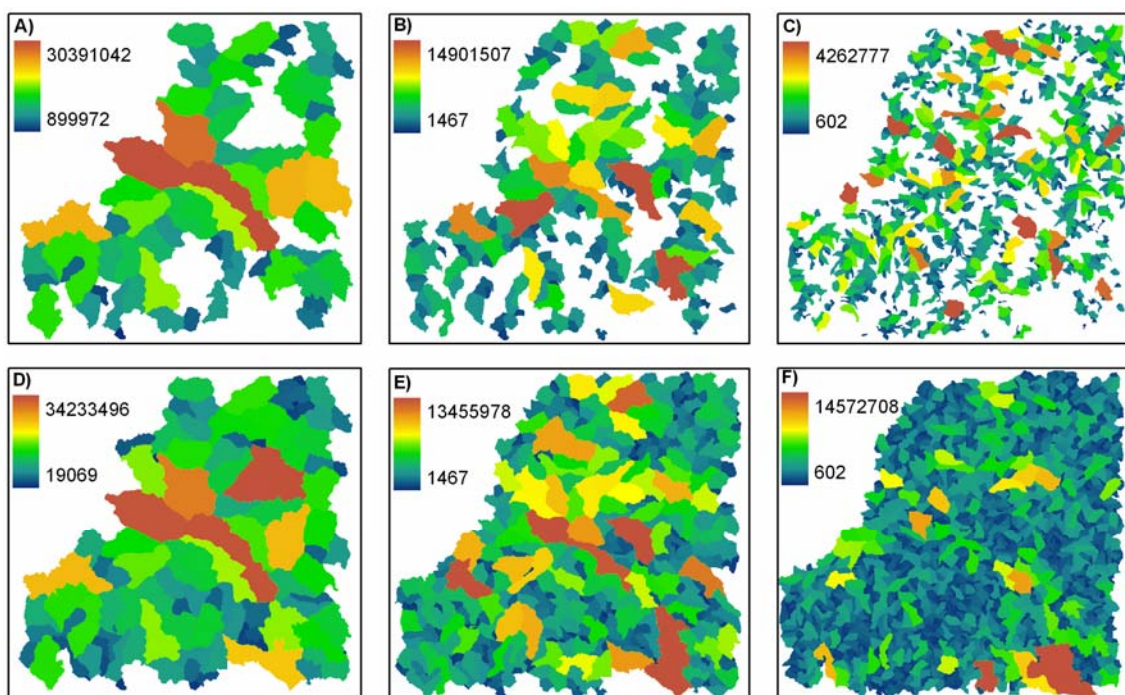


FIGURA 22 - Sombreamento do relevo com a indicação das fraturas e falhas.



**FIGURA 23 - Área das bacias de 3^a ordem (A), 2^a ordem (B) e 1^a ordem (C).
Área das bacias de 3^a ordem mais fragmentos (D), 2^a ordem mais fragmentos (E) e 1^a ordem mais fragmentos (F).**

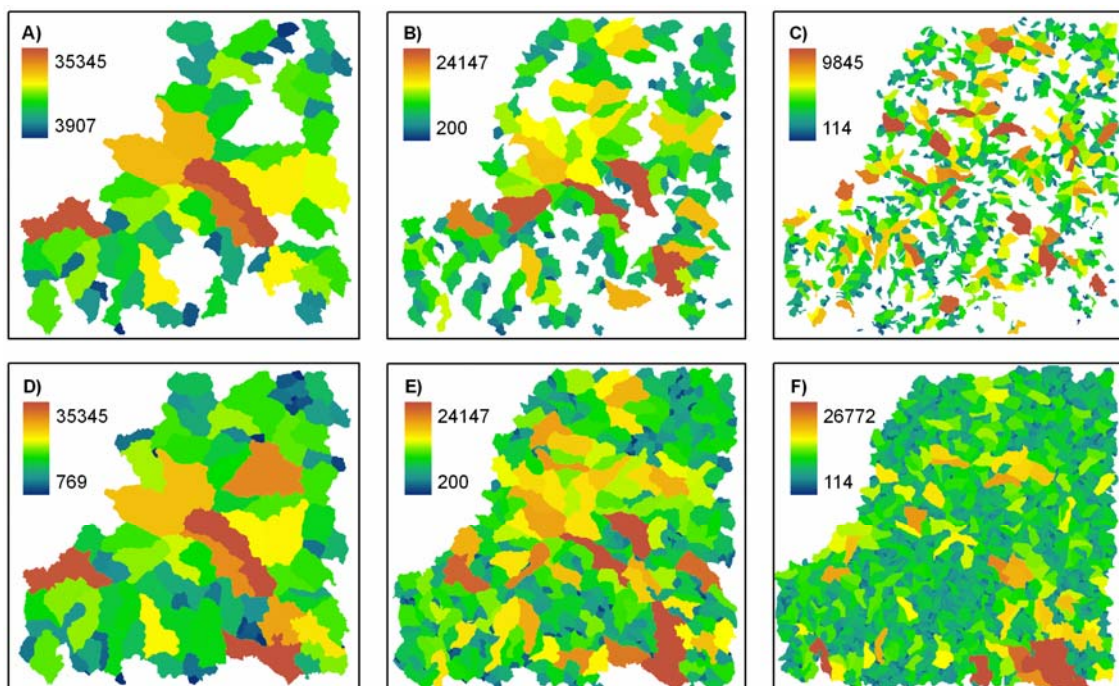


FIGURA 24 - Perímetro das bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B), 1ª ordem (C). Perímetro das bacias de 3ª ordem (D), 2ª ordem (E), 1ª ordem (F).

Perímetro das bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).

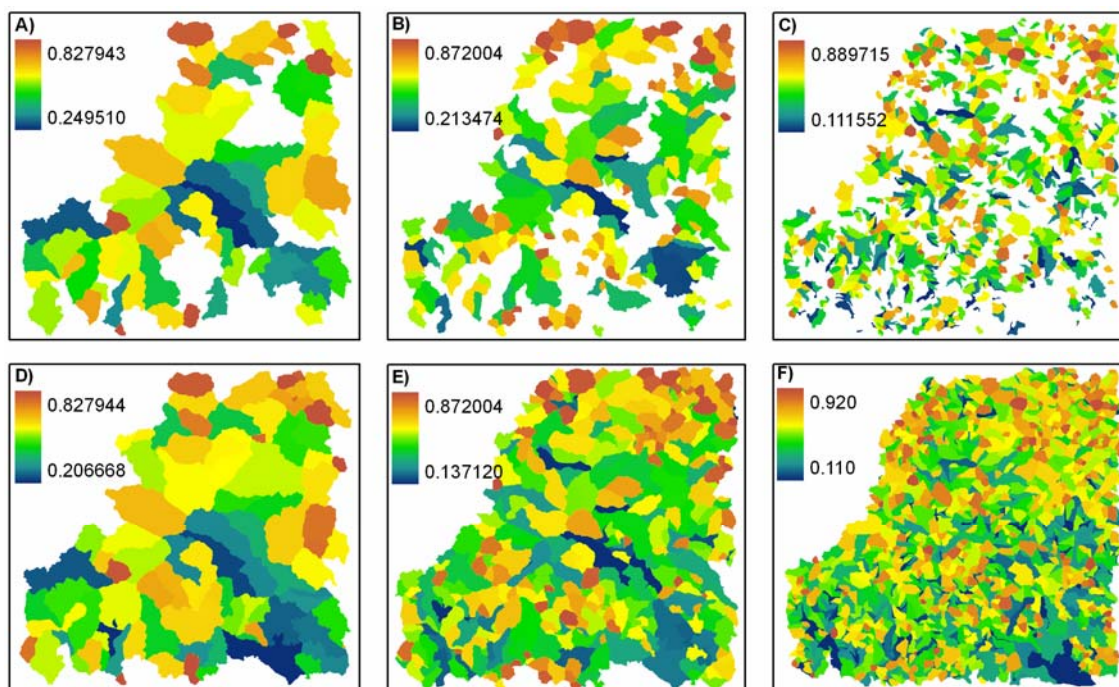


FIGURA 25 - Índice de Circularidade para as bacias de 3ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 1ª ordem (C). Índice de Circularidade para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos (D), 2ª ordem mais fragmentos (E) e 1ª ordem mais fragmentos (F).

3.2 - Resultados da análise multivariada das bacias de drenagem

3.2.1 - Análise de Principais Componentes (APC)

A APC permitiu descrever as principais dimensões de variabilidade presentes nos dados. Desta forma, possibilitou diminuir o número de nove variáveis em três componentes, cuja soma corresponde mais de 80% da variação total dos dados, sendo para a 1ª ordem (91,9%), 2ª ordem e 3ª ordem (87,8%). A porcentagem de contribuição de cada componente é expressa pelos autovalores referentes às barras apresentadas nas **Figuras 26 e 27**.

As configurações dos valores das principais componentes para as bacias permitem estipular padrões espaciais, sendo que as bacias de maior ordem fluvial estabelecem arranjos espaciais mais nítidos como pode ser observado nas **Figuras 28, 29 e 30**.

A distribuição espacial da primeira componente para as bacias das três ordens fluviais analisadas evidenciam comportamentos distintos para NNW e SSE e que coincidem com a localização da escarpa da Serra dos Órgãos (**Figura 28**). Além disso, permite realçar uma zona central onde ocorrem as maiores declividades do relevo.

A segunda componente apresenta maior influência dos fatores relativos ao perímetro, área, índice de circularidade e altura mínima como descreve os seus autovetores. Apesar dos padrões não serem tão distintos pode-se observar arranjos espaciais na parte central e a nordeste da área (**Figura 29**).

A terceira componente nas diferentes ordens fluviais apresenta uma forte influência dos parâmetros relativos aos dados de gradiente topográfico (desvio padrão da altimetria, amplitude topográfica e média da declividade) como evidenciam os autovetores. Nessa componente as bacias com maior influência da escarpa tornam-se bem destacadas na porção SSE (**Figura 30**).

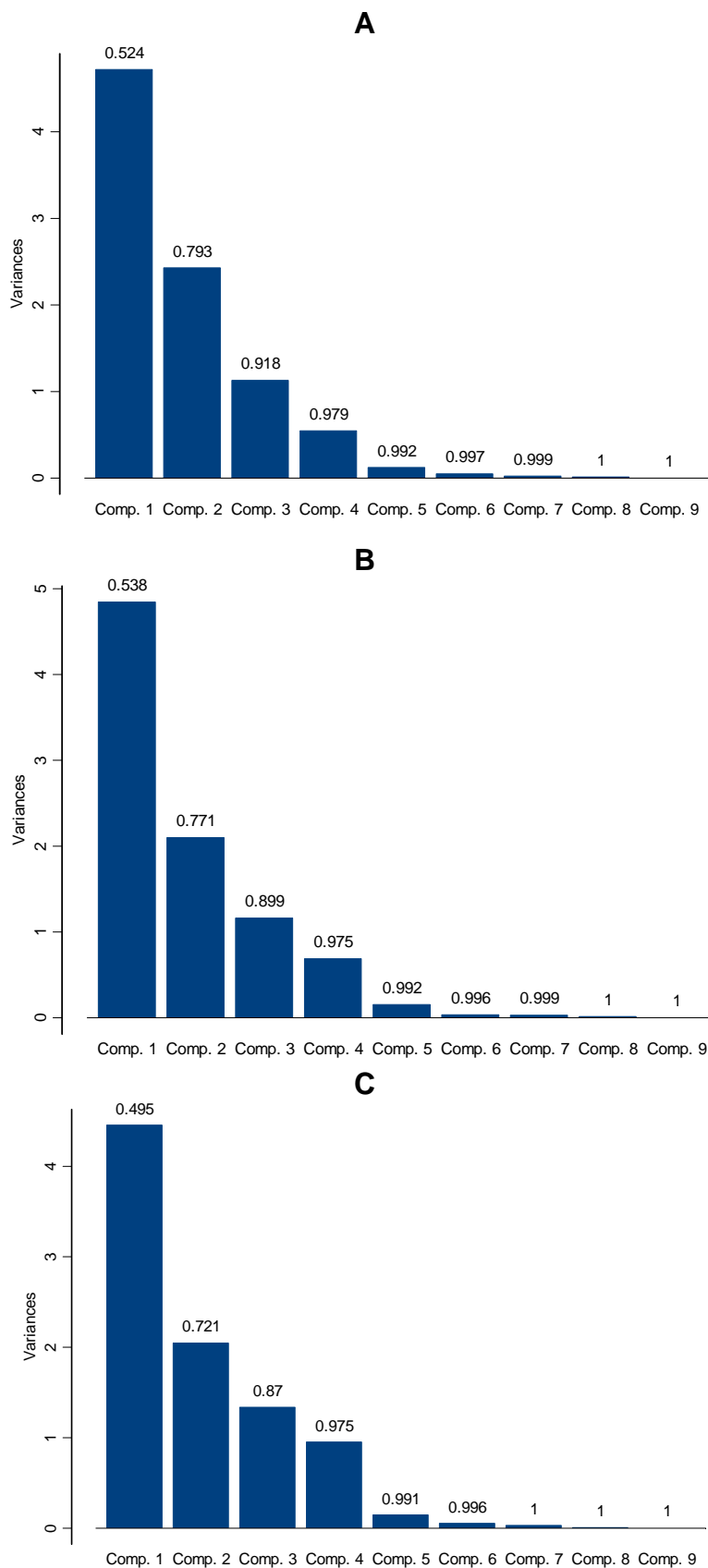


FIGURA 26 - Importância relativa das principais componentes para: (A) bacias de 1^a ordem, (B) bacias de 2^a ordem, (C) bacias de 3^a ordem.

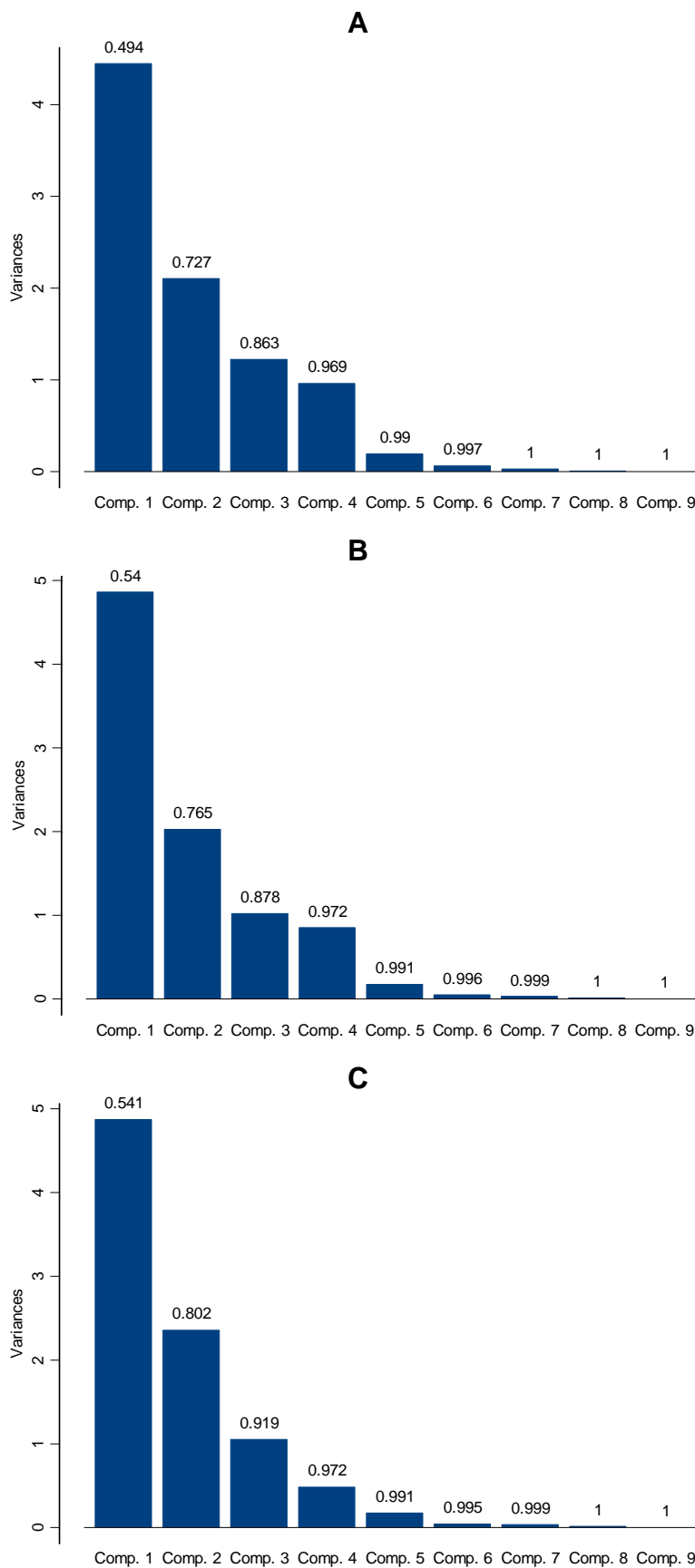


FIGURA 27 - Importância relativa das principais componentes para as bacias e fragmentos de: 1ª ordem (A), 2ª ordem (B) e 3ª ordem (C).

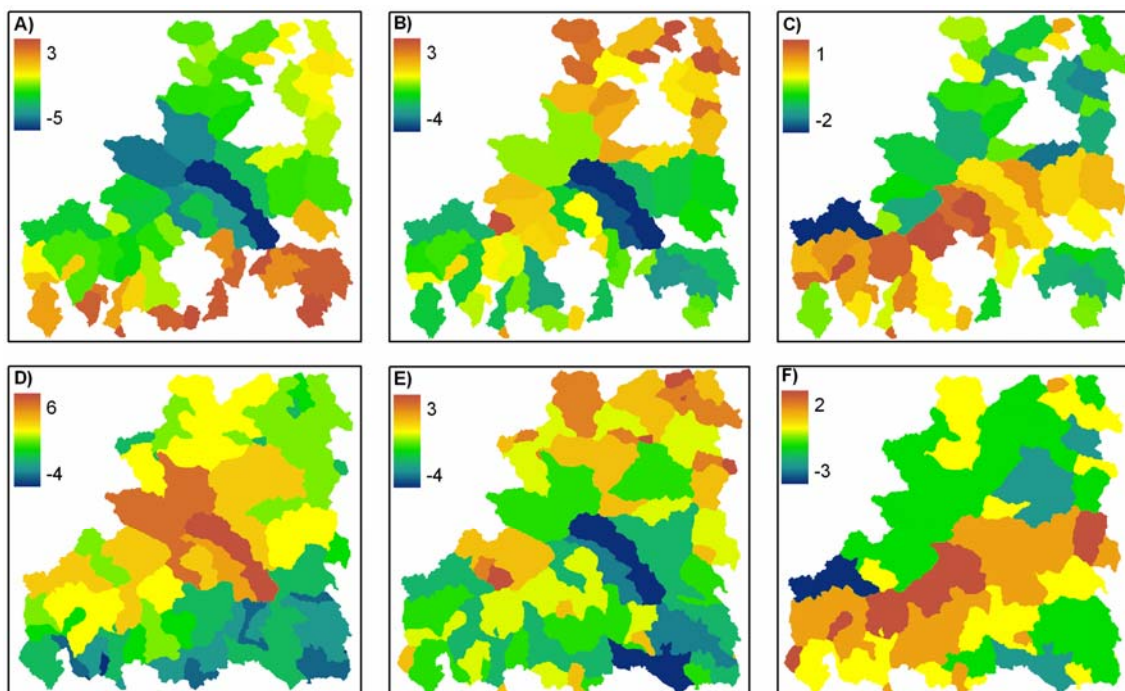


FIGURA 28 - APC para as bacias de 3ª ordem: 1ª componente (A); 2ª componente (B); 3ª componente (C). APC para as bacias de 3ª ordem mais fragmentos: 1ª componente (D); 2ª componente (E); 3ª componente (F).

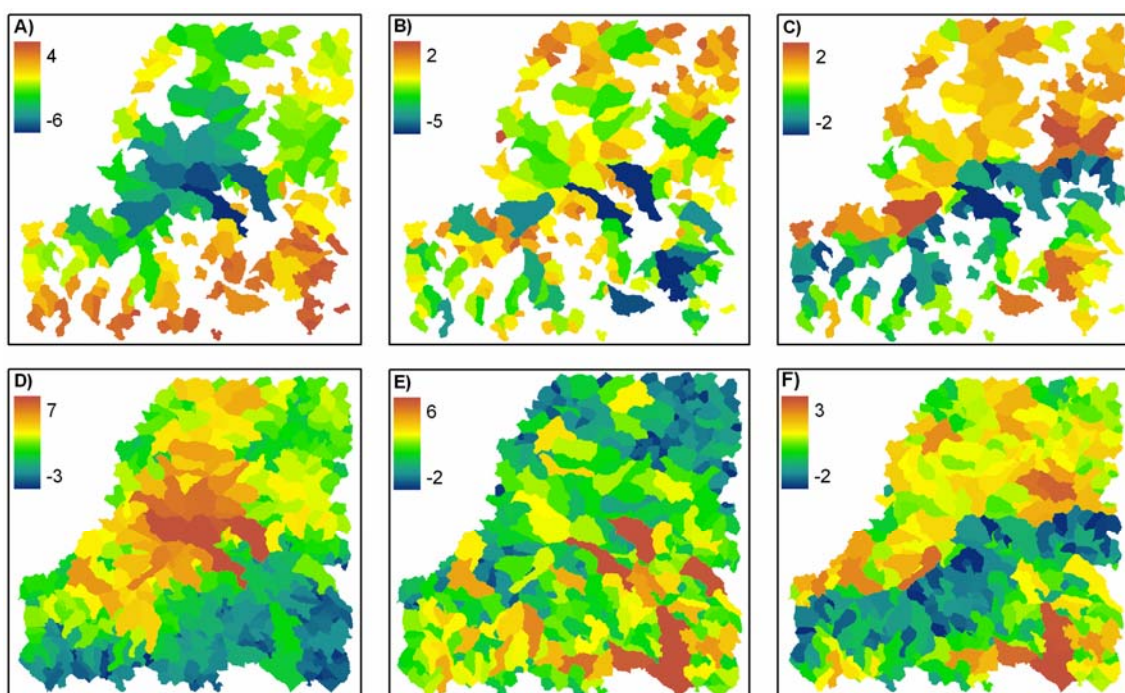


FIGURA 29 - APC para as bacias de 2ª ordem: 1ª componente (A); 2ª componente (B); 3ª componente (C). APC para as bacias de 2ª ordem mais fragmentos: 1ª componente (D); 2ª componente (E); 3ª componente (F).

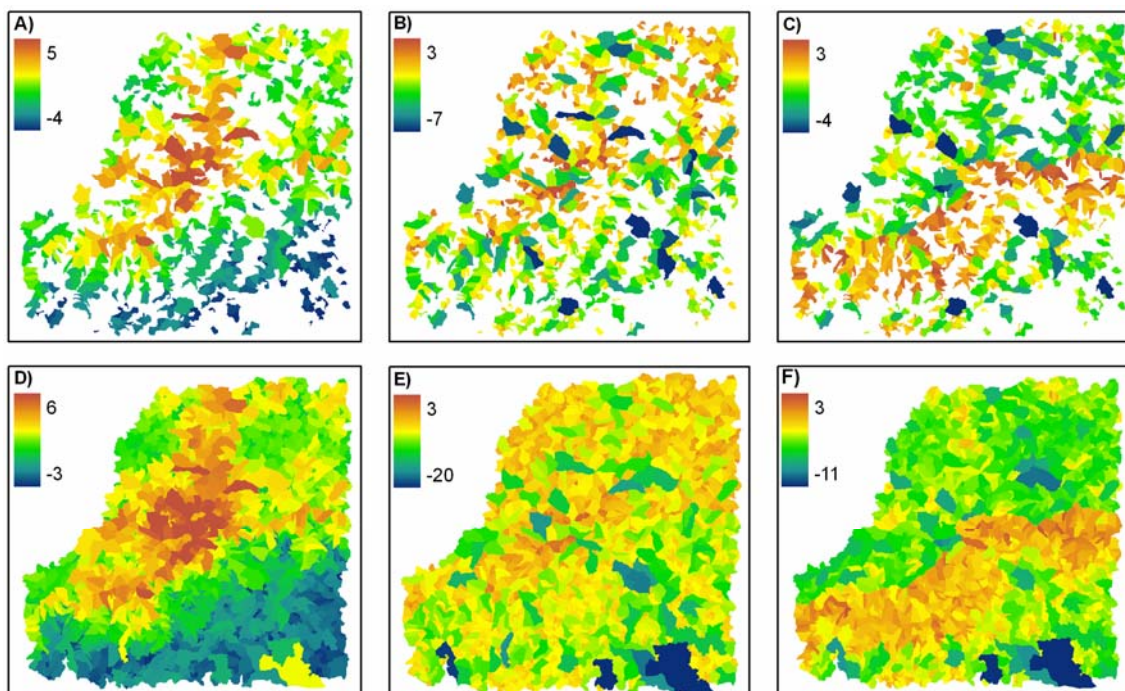


FIGURA 30 - APC para as bacias de 1ª ordem: 1ª componente (A); 2ª componente (B); 3ª componente (C). APC para as bacias de 2ª ordem mais fragmentos: 1ª componente (D); 2ª componente (E); 3ª componente (F).

3.2.2 - Análise de Grupos

Com o emprego da análise de grupos todos os fatores podem ser utilizados na indicação de conjuntos de bacias com comportamentos semelhantes. Os grupos de bacias permitem individualizar unidades homogêneas e estão vinculados, por sua vez, com as características geomorfológicas da região.

Para as bacias de terceira ordem fluvial, que possuem menor número total, foi possível comparar os métodos de análise de grupos hierárquicos e não hierárquicos para as bacias sem a fragmentação e com a fragmentação (**Figura 31**). Os agrupamentos individualizados para a área de estudo foram os seguintes: áreas de baixada (classe 1 para as bacias sem fragmentos e classes 1 e 2 para as bacias com fragmentos), escarpa (classes 3, 4 e 5 para os dois padrões) e as áreas de planaltos (classes 2, 6 e 7 para as bacias sem fragmentos e classes 6 e 7 para as bacias com fragmentos). Os resultados obtidos por esses dois métodos apresentaram padrões de agrupamentos de bacias semelhantes, no entanto, a subdivisão de cada classe principal apresentou diferenças (**Figura 31**). Na

classificação hierárquica a bacia do rio Soberbo consiste em uma classe específica (classe 5), o que não acontece na classificação não-hierárquica.

A classificação utilizando o método não hierárquico para as bacias de 2ª ordem apresenta um detalhamento do padrão presente na classificação para as bacias de 3ª ordem, com as classes posicionadas paralelamente a escarpa serrana (**Figura 32**).

Na classificação das bacias de 1ª ordem observa-se o delineamento de uma classe central relativo as áreas com maiores altitudes (classe 5). Nesta região de topografia elevada do planalto existe uma distribuição das classes 6 e 7 a partir da área central, enquanto a região da planície apresenta um arranjo espacial das classes 1 e 2 paralelo a escarpa de forma bem definida (**Figura 33**).

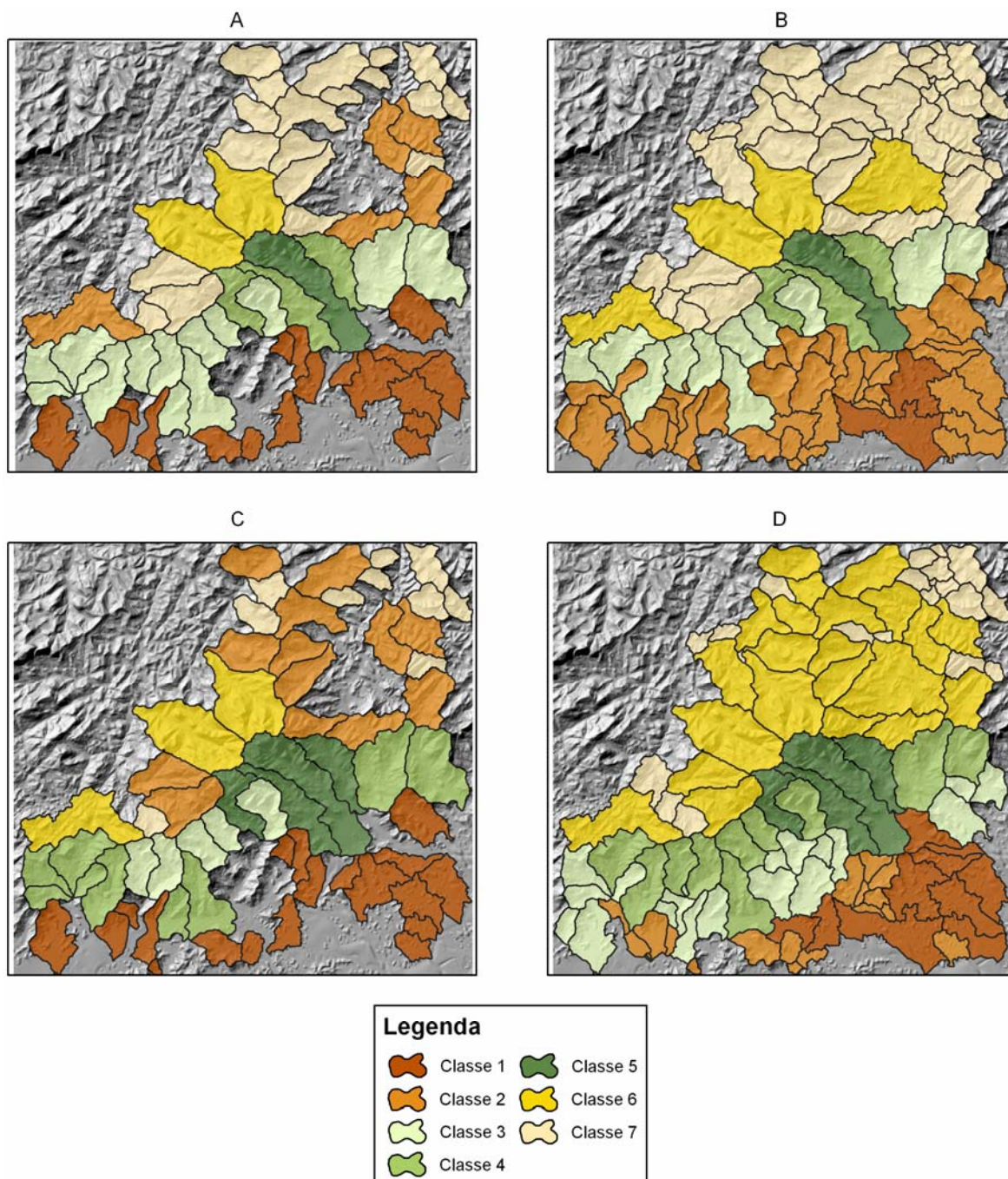


FIGURA 31 - Método Hierárquico por Aglomeração com distância Euclidiana para as bacias apenas de 3ª ordem (A) e para as bacias de 3ª ordem e fragmentos (B). Classificação pelo Método K-Means para as bacias apenas de 3ª ordem (C) e para as bacias de 3ª ordem e fragmentos (D).

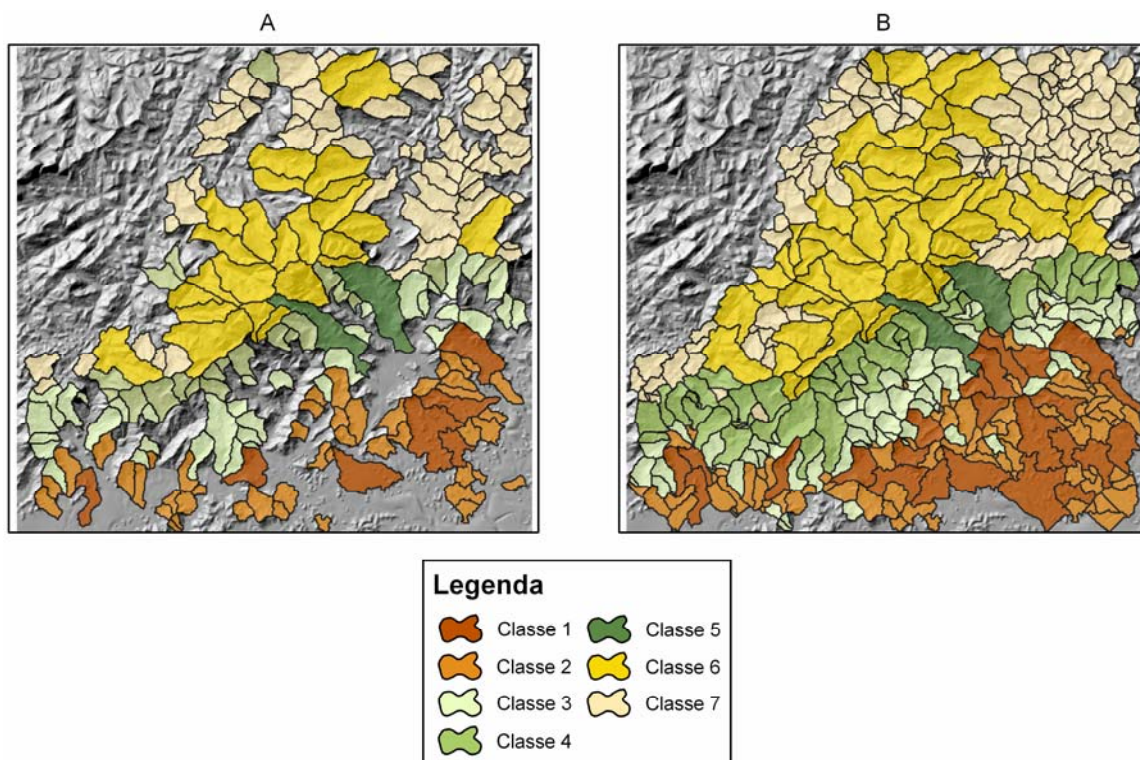


FIGURA 32 - Classificação pelo Método K-Means para as bacias apenas de 2ª ordem (A) e para as bacias de 2ª ordem e fragmentos (B).

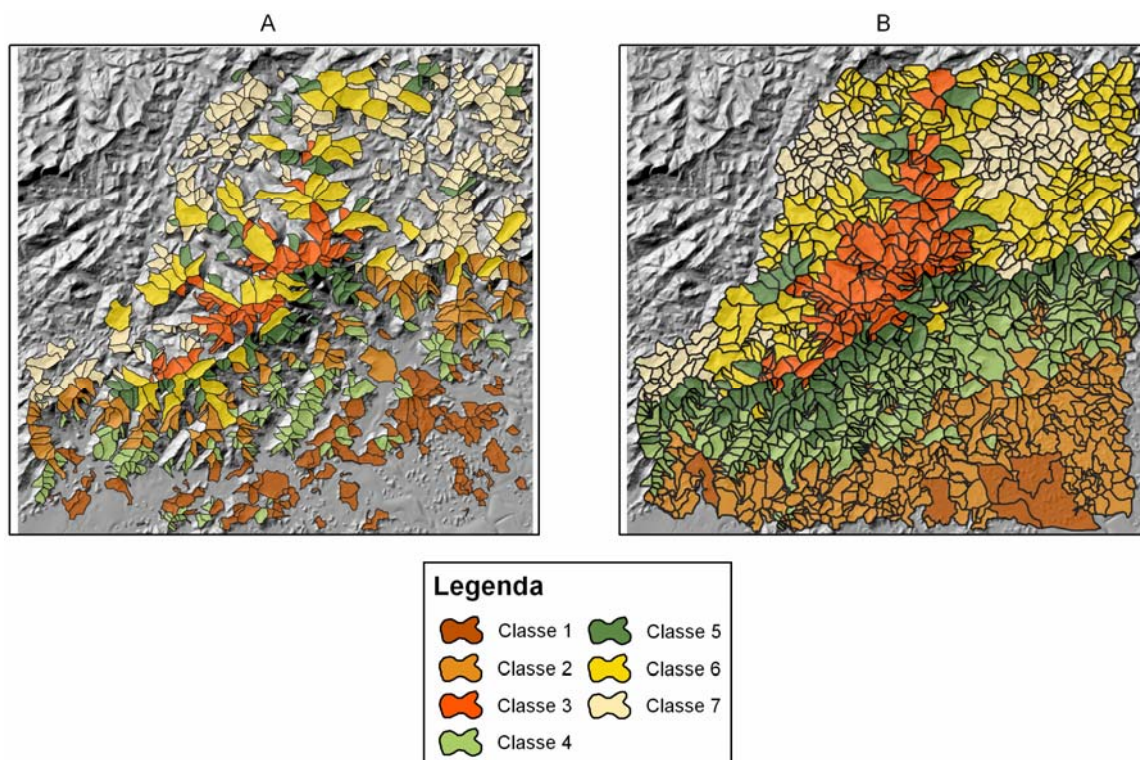


FIGURA 33 - Classificação pelo Método K-Means para as bacias apenas de 1ª ordem (A) e para as bacias de 1ª ordem e fragmentos (B).

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

A metodologia empregada para obtenção de um MDT hidrologicamente corrigido permitiu uma acurada delimitação automática das bacias de drenagem. Para tanto, foram utilizados métodos adequados de interpolação (TOPOGRID) e de procedimentos para a correção de erros como preenchimento das depressões artificiais e introdução de informações sobre as localizações de rede de drenagem e dos lagos.

A obtenção das métricas das bacias de drenagem permitiu caracterizá-las de forma satisfatória. O emprego de métodos estatísticos multivariados permitiu constatar a presença de grupos de bacias com comportamento e dinâmicas evolutivas similares. A análise realizada a partir da distribuição das bacias de ordens hierárquicas diferentes permite indicar a utilização de uma abordagem escalar de ordens hierárquicas onde pode constatar um agrupamento dos parâmetros analisados e também de detectar diferenciações de padrões comportamentais das bacias de drenagem.

Para a área do PARNASO os parâmetros analisados permitiram evidenciar comportamentos distintos entre as bacias que drenam em direção ao continente e em direção ao litoral, caracterizando ambientes com dinâmicas diferenciadas. Enquanto as bacias interioranas são caracterizadas por ambientes mais suavizados, as bacias voltadas para o litoral possuem escarpas íngremes resultando em ambientes mais dinâmicos.

A comparação dos resultados dos dados morfométricos e dos agrupamentos para os dois padrões de bacias (só a ordem analisada e ordem analisada mais fragmentos) demonstrou que a ordem analisada mais os fragmentos permitem um melhor delineamento de compartimentos.

A metodologia desenvolvida baseada, principalmente, no tratamento morfométrico de bacias de drenagem a partir da utilização de métodos computacionais pode ser utilizada através do cálculo de parâmetros estatísticos de forma mais rápida, eficiente e padronizada que podem ser aplicados a outras localidades permitindo apreender uma diferenciação de ambientes com comportamentos morfodinâmicos distintos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, M. T. A. 1977. Vegetação. In: Geografia do Brasil: Região Sudeste. Rio de Janeiro: IBGE, 3:91-118.
- Band, L. E. 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research* 22 (1), 15-24.
- Band, L. E. 1989. A terrain-based watershed information system. *Hydrological Processes* 4, 151-162.
- Brito, L. T. L.; Silva, A. S.; Srinivasan, V.; Galvão, C. O.; Gheyi, H. R. 2006. Uso de análise multivariada na classificação das fontes hídricas subterrâneas da bacia hidrográfica do Salitre. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, SP, v. 26, n. 1, p. 36-44.
- Cardoso, C. A.; Dias; H. C. T.; Soares, C. P. B.; Martins, S. V. 2006. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore* 30 (2), 241-248.
- Caruso, R. C.; Pinatti, E.; Giannotti, J. G.; Francisco, V. L. F. S.; Bezerra, L. M. C. 2006. Caracterização da pecuária no Vale do Paraíba paulista utilizando a análise multivariada. In: Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 51, 2006, Botucatu. *Anais da 51ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria*.
- Chomwicz, J.; Ichoku, C.; Riazanoff, S.; Kim, Y. J.; Cervelle, B. 1992. A combined algorithm for automated drainage network extraction. *Water Resources Research* 28 (5), 1293-1302.
- Christofolletti, A. 1980. *Geomorfologia*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. 188pp.
- Costa, M.C.; Furtado, A.L.S. 2005. Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas. *Série Documentos EMBRAPA Monitoramento por Satélite*, 43, 1-28.
- Costa, T. C.; Uzeda, M. C.; Fidalgo, E. C. C.; Lumbreras, J. F.; Zaroni, M. J.; Naime, U. J.; Guimarães, S. P. 2007. Vulnerabilidade ambiental em sub-bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro por meio de integração temática da perda de solo (USLE), variáveis morfométricas e o uso/cobertura da terra. In:

Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis (SC). Anais... Florianópolis, 2007, CD-ROM.

Costa-Cabral, M. C.; Burges, S. J. 1994. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resources Research* 30 (6), 1681-1692.

Demattê; J. A. M. & Demétrio V. A. 1995. Fotointerpretação de padrões de drenagem de bacias hidrográficas na caracterização de solos desenvolvidos de rochas eruptivas básicas no estado do Paraná. *Scientia Agricola*. 52 (3), 567-577.

Desmet, P. J. J. & Govers, G. 1996. Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullie. *International Journal of Geographical Information Systems* 10(3), 311-331.

EMBRAPA. 1992. Mapa de Solos do estado do Rio de Janeiro. EMBRAPA-SNLCS, Rio de Janeiro. Disponível em: www.cnps.embrapa.br.

ESRI. 1990. *Understanding GIS: the ArcInfo method*. Redlands, CA, USA: ESRI Press.

Ferrari, A. L.; Melo, E. F.; Vaz, M. A.; Dalcomo.; M. T.; Brenner, T. L. Silva, V. P. Nassar, W. N. 1981. Folha Itaboraí, Maricá, Saquarema, e Baía de Guanabara. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: DRM/Geomitec.

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

Garbrecht, J., Martz, L. W. 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models *Journal of Hydrology* 193, 204–213.

Grimaldi, S.; Nardi, F.; Benedetto F.; Istanbuluoglu, E.; Brás, R. L. 2007. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources* 30, 2151–2158.

Grobe, J. R.; Marques, J. M. 2006. O método de análise fatorial aplicado ao estudo de resultados de análise de solos. *Synergismus Scyentifica UTFPR*, v. 1, p. 237-243.

Hadley, R. F.; Schumm, S.A. 1961. Sediment sources and drainage basin

characteristics in Upper Cheyenne River basin. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1531-B, pp.137-197.

Hair Jr., J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; 1987, *Multivariate Data Analysis*, 2.ed. New York: Macmillan Publish Company. 449 pp.

Horton, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* 56, 275-370.

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

Jenson, S. K.; Domingue, J. O. 1987. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54, 1593-1600.

Landim, P. M. B. 2006. Análise estatística espacial de dados geológicos multivariados. Laboratório de Geomatématica IGCE/ENESP, Rio Claro: Unesp. Publicações Didáticas, 15. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/multiespacial.pdf>>.

Langbein, W. B. 1964. Geometry of river channels. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 90 (HY2), 301–312.

Langbein, W. B.; Leopold, L. B. 1964. Quasi-equilibrium states in channel morphology. *American Journal of Science* 262, 782–794.

LANNA, A. E. L. 1995. Gerenciamento de Bacia Hidrográfica - Aspectos Conceituais e Metodológicos. Brasília, DF. 170p.

Lindsay, J. B.; Creed, I. F. 2005. Sensitivity of digital landscapes to artifact depressions in remotely-sensed DEMs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71 (9), 1029–36.

Llamas, J. 1993. *Hidrología General: principios y aplicaciones*. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 627pp.

Mackay, S. D.; Band, L. E. 1998. Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake dominated topography. *Water Resources Research* 34, 897–901.

Mark, D. M. 1983. Relations Between field-surveyed channel networks and map-based geomorphometric measures, Inez, Kentucky. *Annals of the Association of American Geographers* 73(3), 358-372.

Martinelli, G. 1989. *Campos de altitude*. Rio de Janeiro: Editora Index, 158 pp.

Martz, L. W., De Jong, E., 1988. Catch: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. *Computers and Geosciences* 14 (5), 627–640.

Martz, L. W., Garbrecht, J. 1995. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method - comment. *Journal of Hydrology*, 167, 393-396.

Martz, L. W., Garbrecht, J., 1992. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers and Geosciences* 18 (6), 747–761.

Martz, L. W., Garbrecht, J., 1993. Automated extraction of drainage network and watershed data from digital elevation models. *Journal of the American Water Resources Association* 29 (6), 901–908.

Mather, P. M., Doornkamp, J. C. 1970. *Multivariate Analysis in Geography with Particular Reference to Drainage-Basin Morphometry*. *Transactions of the Institute of British Geographers* 51, 163-187.

Meis, M. R. M.; Miranda, L. H. G.; Fernandes, N. F. 1982. Desnívelamento de altitude como parâmetro para a compartimentação do relevo: bacia do médio-baixo Paraíba do Sul. In: *Congresso Brasileiro de Geologia (CBG)*, 32, Salvador (BA). *Anais*. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia. 4: 1489-1509.

Mesa, L. M. 2006. Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina). *Environmental Geology* 50, 1235–1242

Miller, V. C. 1953. *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*. Technical report, 3, Office of Naval Research. Department of Geology, Columbia University, New York.

Montgomery, D. R.; Dietrich, W. E. 1992. Channel initiation and the problem of

landscape scale. *Science* 255, 826–830.

Morris, D. G.; Heerdegen, R. G., 1988. Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications. *Geomorphology* 1, 131-141.

Nimer, E. 1977. Clima. In: *Geografia do Brasil: Região Sudeste*. Rio de Janeiro: IBGE, 3: 51-89.

O'Callaghan, J. F., Mark, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*. 28, 323–344.

PARNASO. 2007. *Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra dos Órgãos*. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

Penha, H.; Ferrari, A. L.; Junho, M. C. B.; Souza, S. L. A.; Brenner, T. L. 1981. Folha Itaipava. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: DRM/UFRJ.

Penha, H.; Ferrari, A. L.; Ribeiro, A.; Amador, E. S.; Pentagna, F. V; Junho, M. C. B.; Brenner, T. L. 1979. Folha Petrópolis. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: DRM/UFRJ.

Pinto, C. P.; Serpa, J. C.; Dutra, J. E. B; Hettich, M.; Andrade, N. T. 1980. Folhas Anta, Duas Barras, Teresópolis e Nova Friburgo. Projeto carta geológica do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: DRM/Geosol.

Pinto, N. L. de S., Holtz, A. C. T.; Martins, J. A. 1973. *Hidrologia de superfície*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 179 pp.

Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P.; Planchon, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5, 59-80.

Radambrasil. 1983. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral - Folhas SF. 23/24 Rio de Janeiro/Vitória. *Geologia*. Volume 32. Rio de Janeiro, pp. 56-66.

Ramos, V. M., Guimarães, R. F., Redivo, A. L., Carvalho Júnior, O. A. de, Fernandes, N. F., Gomes, R. A. T. 2003. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. *Revista Brasileira de*

Geomorfologia 4(2), 41-49.

Reddy, G. P. O.; Maji, A. K.; Gajbhiye K.S. 2004. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India – a remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 6, 1–16.

Richards, J. A. 1986. *Remote sensing digital images analysis: An introduction*. Berlin: Springer-Verlag. 281p.

Rizzini, C. T. 1979. *Tratado de fitogeografia do Brasil*. São Paulo, Hucitec, v.2. 374 p.

Rodriguez-Iturbe, I.; Ijjasz-Vasquez, E.; Bras, R.L., 1992a. Power law distributions of mass and energy in river basins. *Water Resources Research* 28 (4), 1089–1093.

Rodriguez-Iturbe, I.; Rinaldo, A.; Rigon, R.; Bras, R.L.; Marani, A.; Ijjasz-Vasquez, E., 1992b. Energy dissipation, runoff, and the three-dimensional structure of river basins. *Water Resources Research*, 28 (4), 1095–1103.

ROSA, F. 1999. Significância prática em análise multivariada: um caso de aplicação de análise fatorial em dados de potencial de mercado bancário no Brasil. In: IV SEMEAD USP, 1999, São Paulo. *Anais do IV SEMEAD*.

Silva, T. M. 2002. *A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro*. 265p. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia – IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro.

Silva, T. M. 2003. *A estruturação geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro*. In: SBGFA, Simp. Bras. Geografia Física Aplicada, 10, Rio de Janeiro, *Anais*, 11 pp.

Silva, T. M. 2005. *Mapeamento Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro com base na técnica desnivelamento altimétrico*. In: Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), 22, Macaé (RJ). *Anais*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2005. CD-ROM.

Silveira, A. L. L. 2001. *Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica*. In: C.E.M. Tucci, (Org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2 ed.; Porto Alegre: Editora da

Universidade/UFRGS, ABRH, pp.: 35-51.

Smart, J. S. 1968. Statistical properties of stream lengths. *Water Resources Research* 4 (5), 932-936.

Soille, P.; Vogt, J.; Colombo, R. 2003. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. *Water Resources Research* 39(12), 1366. doi: 10.1029/2002WR001879.

Souza, A. K. P. S.; Batista, G. T. 2007. Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Alto Rio Jamaxim, Pará, Brasil. *Revista Ambiente e Água* 2 (2), 69-87.

Strahler, A. N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63 (10), 1117-1142.

Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Section 4-2. In: Ven te Chow, Editor, *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill, New York, pp. 4-55.

Tarboton, D. G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 (2), 309-319.

Tarboton, D. G. 2005. *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)*. <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/>. Acesso em 05/02/2008.

Tianqi, A.; Takeuchi, K.; Ishidaira, H.; Yoshitani, J.; Fukami, K. 2003. Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs. *Hydrological Sciences Journal*, 48 (6), 985-997.

Tonello, K. C. *Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões, MG*. 2005. (Dissertação de mestrado), Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 69 f.

Tribe, A. 1992. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139:263-293.

Turcotte, R.; Fortin, J. P.; Rousseau, A. N.; Massicotte, S.; Villeneuve, J. P. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation

model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240:225-242.

UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 1999. Projeto Teresópolis - Estudo ambiental como subsídio para ordenamento territorial através de análise de caso: Município de Teresópolis, RJ. PADCT, Relatório Final (3 volumes), Rio de Janeiro.

Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente (2003) Projeto Rio Paquequer - Diagnóstico Urbanístico de Teresópolis, RJ. Convênio Centro Comunitário Peixinho Dourado Oceansat.

Villela, S. M.; Mattos, A. 1975. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill, 245p.

Vogt, J. V.; Colombo, R.; Bertolo, F. 2003. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology* 53, 281-298.