

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA**

**ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO COMO APOIO PARA A CARTOGRAFIA  
GEOMORFOLÓGICA DA PORÇÃO CENTRAL DA SERRA DO MAR  
PARANAENSE**

**CURITIBA**

**2015**

**RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA**

**ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO COMO APOIO PARA A CARTOGRAFIA  
GEOMORFOLÓGICA DA PORÇÃO CENTRAL DA SERRA DO MAR  
PARANAENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Curso de Mestrado, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Taborda da  
Silveira

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Chisato Oka-Fiori

**CURITIBA**

**2015**

---

S587a

Silveira, Ricardo Michael Pinheiro

Análise digital do relevo como apoio para a cartografia geomorfológica da porção central da Serra do Mar paranaense/ Ricardo Michael Pinheiro  
Silveira. – Curitiba, 2015.

122 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia, 2015.

Orientador: Claudinei Taborda da Silveira – Co-orientador: Chisato Oka-Fiori.

Bibliografia: p. 113-122.

1. Geomorfologia - Classificação. 2. Geografia física - Paraná - Morfometria. 3. Modelagem geológica. 4. Relevo - Serra do Mar (PR). I. Universidade Federal do Paraná. II. Silveira, Claudinei Taborda da. III. Oka-Fiori, Chisato. IV. Título.

CDD: 551.41

---



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA** intitulada "ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO COMO APOIO PARA A CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA DA PORÇÃO CENTRAL DA SERRA DO MAR PARANAENSE" para obtenção do grau de Mestre em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração Espaço, Sociedade e Ambiente, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise Ambiental.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o (a) candidato (a), são de parecer pela APROVAÇÃO da Dissertação.

Curitiba, 12 de março de 2015.

Nome e Assinatura da Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira - orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos – PPGGEO/UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Arnaldo Troncoso Gomes - UNB

*À minha tríade materna,  
unidade morfoestrutural elementar.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Paraná por propiciar o ambiente de formação e pela excelência acadêmica;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo;

Ao Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Chisato Oka-Fiori, pela orientação, dedicação, amizade e por sempre acreditarem no potencial do trabalho desenvolvido ao longo da minha formação acadêmica;

Ao Programa de Pós Graduação em Geografia (PPGGEO/UFPR), em sua totalidade: professores, funcionários e alunos;

Ao Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO) e a todos os participantes envolvidos, atuais e pretéritos, pelo auxílio, aprendizado, convivência e experiências compartilhadas;

À minha família, em especial à minha mãe, pelo incentivo constante, pela motivação de cursar o mestrado com maestria e pelo apoio em todos os momentos. Esse trabalho é feito por vocês e para vocês;

À família Bassi-Pregolini, pelo acolhimento, amizade e por manter a "História Viva";

Aos amigos Julio Pregolini, Vinicius da Silva, Vivaldo Manuélis, Dieiny Crestani, Renato Pregolini, Clotilde Zai e mercenários Josemar Silva e Nataniel Mussolini;

À coragem, à força e à sabedoria: virtudes intrínsecas ao êxito.



*"La utopía está en el horizonte. Camino dos pasos, ella se aleja dos pasos y el horizonte se corre diez pasos más allá. Por mucho que yo camine, nunca la alcanzaré. ¿Entonces para que sirve la utopía? Para eso, sirve para caminar."*

Fernando Birri, citado por Eduardo Galeano.

## RESUMO

O desenvolvimento da geomorfometria nas últimas décadas, impulsionada pelo avanço das geotecnologias e da informática, configura um cenário favorável para a utilização da análise digital do relevo aplicada à identificação de formas e unidades geomorfológicas. Nessa perspectiva, com o intuito de testar técnicas digitais que possam auxiliar trabalhos de cartografia geomorfológica, o presente trabalho se propõe a elaborar um mapeamento de unidades de relevo e formas de vertente da porção central da Serra do Mar Paranaense com base em classificações semiautomatizadas de atributos topográficos derivados de Modelo Digital do Terreno (MDT). O MDT, com resolução horizontal de 15 metros, foi construído a partir de dados vetoriais planialtimétricos de cartas topográficas na escala 1:25.000 pelo método denominado *Topogrid*, seguido do cálculo de oito atributos para a caracterização geomorfométrica: declividade, aspecto, plano de curvatura, perfil de curvatura, relevo sombreado, acumulação de fluxo (atributos topográficos primários) e índice topográfico de umidade e índice de posição topográfica (atributos topográficos secundários). Inicialmente foram realizados testes estatísticos para avaliar a qualidade do MDT, em dois momentos: a) análise da variação da resolução horizontal (5, 10, 15 e 20 metros) de MDTs de mesmo interpolador (método *Topogrid*); b) comparação entre Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de distintas resoluções e distintas fontes de aquisição (MDT *Topogrid* e MDEs *Aster GDEM*, *SRTM-C v2 e v4*, *SRTM-X* e acervo *Topodata*). Sequencialmente foram aplicados dois métodos de classificação de formas do relevo: a) classificação de Hammond/Dikau, que consiste num sistema de classificação em três níveis hierárquicos resultante da combinação de variáveis morfométricas (declividade e gradiente altimétrico) calculadas a partir de uma janela móvel definida; b) Índice de Posição Topográfica, que mensura a diferença entre a elevação de um ponto central e a média da elevação do entorno com um raio predeterminado, cuja discretização para determinação de classes morfológicas considera os valores de desvio padrão. A partir dos resultados mais representativos denotados por estas duas classificações, os mapas de unidades de relevo (com 13 classes) e formas de vertente (com 27 classes) foram elaborados por uma classificação determinística, amparada pelo conhecimento geomorfológico prévio da área de estudo. Os resultados obtidos pelas classificações preliminares e mapas finais apontaram que as classificações geomorfométricas são sensíveis às características dos MDEs e dos parâmetros adotados na modelagem, destacando a importância do rigor metodológico para a eficácia da classificação resultante. O mapa de unidades de relevo permitiu identificar os principais compartimentos topográficos homogêneos e feições específicas da área de estudo, reforçando a potencialidade do emprego da análise digital do relevo aplicada a levantamentos geomorfológicos preliminares que podem subsidiar a construção de mapas geomorfológicos com baixo custo operacional.

Palavras-chave: Geomorfologia; Geomorfometria; Modelo Digital de Elevação; Classificação geomorfológica; Formas de relevo.



## ABSTRACT

The development of geomorphometry in recent decades, boosted by the advancement of geotechnology and computers, sets a favorable scenario for the use of the digital terrain analysis applied to the identification of forms and geomorphological units. From this perspective, in order to test digital techniques that can help geomorphological mapping works, this study aims to develop a landform e slope form mapping of the central portion of the Serra do Mar Paranaense based on semi-automated classifications of topographic attributes derived from Digital Terrain Model (DTM). The DTM, with horizontal resolution of 15 meters, was built from planialtimetric vector data of topographic maps at 1:25,000 scale by the method called *Topogrid*, followed by the calculation of eight attributes for geomorphometric characterization: slope, aspect, plan curvature, profile curvature, hillshade, flow accumulation (primary topographic attributes) and topographic wetness index and topographic position index (secondary topographic attributes). Initially were performed statistical tests to evaluate the quality of MDT, in two stages: a) analysis of the variation of horizontal resolution (5, 10, 15 and 20 meters) of DTMs of the same interpolator (*Topogrid* method); b) comparison of Digital Elevation Models (DEMs) of different resolutions and different sources of acquisition (MDT *Topogrid* and DEMs *Aster GDEM*, *SRTM C-v2* and *v4*, *SRTM-X* and *Topodata* collection). Sequentially were applied two methods of landforms classification: a) Hammond/Dikau classification, which is a classification system in three hierarchical levels resulting from the combination of morphometric variables (slope and relief) calculated from a defined moving window; b) Topographic Position Index, which measures the difference between the elevation of a central point and the average elevation of the surroundings with a predetermined radius, whose discretization to determine morphological classes considers the standard deviation values. From the most representative results denoted by these two classification, landforms (13 classes) and slope forms (27 classes) maps were produced by a deterministic classification, supported by geomorphological knowledge of the study area. The results obtained by the preliminary classifications and final maps showed that the geomorphometric classifications are sensitive to the characteristics of DEMs and parameters adopted in modeling, highlighting the importance of methodological rigor to the effectiveness of the resulting classification. The landforms map identified the main topographical homogeneous compartments and specific features of the study area, reinforcing the employment potential of digital terrain analysis applied to preliminary geomorphological surveys that can support the construction of geomorphological maps with low operating costs.

Keywords: Geomorphology; Geomorphometry; Digital Elevation Model; Geomorphologic classification; Landforms.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	18
FIGURA 2 - CARACTERIZAÇÃO GEOPEDOLÓGICA DE GRANDES COMPARTIMENTOS HOMOGÊNEOS NA ÁREA DE ESTUDO .....	20
FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TINGIDOR. .....	21
FIGURA 4 - HIERARQUIA TAXONÔMICA GEOMORFOLÓGICA DE DIKAU (1990). .....	37
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO SIMPLIFICADO .....	39
FIGURA 6 – JANELA DE VIZINHANÇA 3X3. ....	42
FIGURA 7 – MÉTODO D-INFINITO PARA CÁLCULO DA DIREÇÃO DE FLUXO. ..	44
FIGURA 8 – ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA. ....	50
FIGURA 9 – SEGMENTOS DE VERTENTE EM PLANO E PERFIL DE CURVATURA .....	57
FIGURA 10 – MAPA HIPSOMÉTRICO .....	59
FIGURA 11 – MAPA DE DECLIVIDADE .....	60
FIGURA 12 – MAPA DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE .....	62
FIGURA 13 – MAPA DO PLANO DE CURVATURA .....	64
FIGURA 14 – MAPA DO PERFIL DE CURVATURA.....	65
FIGURA 15 – MAPA DE ORIENTAÇÕES DAS VERTENTES (ASPECTO).....	66
FIGURA 16 – RELEVO SOMBREADO .....	67
FIGURA 17 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS E VARIAÇÃO DA RESOLUÇÃO HORIZONTAL .....	69
FIGURA 18 – RESULTADOS DA MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A DECLIVIDADE CALCULADA A PARTIR DE DISTINTOS MDEs.....	71
FIGURA 19 – RESULTADOS ESPACIALIZADOS DA MATRIZ DE CONFUSÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TINGIDOR .....	75
FIGURA 20 – DIFERENÇAS DE ELEVAÇÃO ENTRE MDEs SOBREPOSTOS .....	78
FIGURA 21 – MAPA DE 6 CLASSES DO IPT (RAIO DE 21 <i>PIXELS</i> ).....	80
FIGURA 22 – MAPA DE 10 CLASSES DO IPT (RAIO DE 4 E 34 <i>PIXELS</i> ) .....	81
FIGURA 23 – MAPA DE 10 CLASSES DO IPT (RAIO DE 7 E 67 <i>PIXELS</i> ) .....	82
FIGURA 24 – MAPA DE 10 CLASSES DO IPT (RAIO DE 13 E 113 <i>PIXELS</i> ).....	83
FIGURA 25 – INFLUÊNCIA DO FATOR DE ESCALA NOS RESULTADOS DO IPT. .....	86
FIGURA 26 – MAPA DE TIPOS DE RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 7X7 <i>PIXELS</i> ) .....	88
FIGURA 27 – MAPA DE TIPOS DE RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 21X21 <i>PIXELS</i> ) .....	89
FIGURA 28 – MAPA DE TIPOS DE RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 67X67 <i>PIXELS</i> ) .....	90
FIGURA 29 – MAPA DE CLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 7X7 <i>PIXELS</i> ).....	93
FIGURA 30 – MAPA DE CLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 21X21 <i>PIXELS</i> ).....	94
FIGURA 31 – MAPA DE CLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 67X67 <i>PIXELS</i> ).....	95

FIGURA 32 – MAPA DE SUBCLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 7X7 <i>PIXELS</i> ).....	97
FIGURA 33 – MAPA DE SUBCLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 21X21 <i>PIXELS</i> ).....	98
FIGURA 34 – MAPA DE SUBCLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 67X67 <i>PIXELS</i> ).....	99
FIGURA 35 – MAPA GEOMORFOLÓGICO DE FORMAS DE RELEVO (4º TÁXON) .....	102
FIGURA 36 - REPRESENTAÇÃO APROXIMADA DE UNIDADES ESPACIALIZADAS. Fotografia: Oscar Salazar Jr. (2011).....	104
FIGURA 37 - FOTOGRAFIAS GEORREFERENCIADAS NO MAPA DE FORMAS DE RELEVO.....	105
FIGURA 38 - SERRA DA PRATA EM PERSPECTIVA 3D .....	106
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO APROXIMADA ENTRE O MODELO E A REALIDADE DE CAMPO .....	107
FIGURA 40 - COMPARTIMENTOS HOMOGÊNEOS IDENTIFICADOS NA SERRA DA PRATA .....	108
FIGURA 41 – MAPA DE FORMAS DE VERTENTE .....	109
FIGURA 42 - FORMAS DE VERTENTE PREDOMINANTES NA ÁREA DE ESTUDO .....	111

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1 - HIERARQUIA DE UNIDADES DO RELEVO.....	38
QUADRO 2 - PARAMETRIZAÇÃO E PARTICIONAMENTO DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS. ....	52
QUADRO 3 - NÍVEIS HIERÁRQUICOS DA CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA/MORFOMÉTRICA. ....	53
QUADRO 4 – PARÂMETROS EMPREGADOS NAS PROPOSTAS ORIGINAIS E NA ATUAL.....	87

TABELA 1 – IPT DISCRETIZADO EM 6 CLASSES.....	50
TABELA 2 – COMBINAÇÃO DE IPTS DISCRETIZADOS EM 10 CLASSES.....	51
TABELA 3 – PARÂMETROS DO MAPA DE FORMAS DE RELEVO. ....	55
TABELA 4 – PARÂMETROS DO MAPA DE FORMAS DE VERTENTE .....	56
TABELA 5 – CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS .....	69
TABELA 6 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (5 X 10 METROS).....	71
TABELA 7 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (5 X 15 METROS).....	72
TABELA 8 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (5 X 20 METROS).....	72
TABELA 9 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (10 X 15 METROS).....	72
TABELA 10 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (10 X 20 METROS).....	73
TABELA 11 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (15 X 20 METROS).....	73
TABELA 12 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS MDES.....	76
TABELA 13 – COMPARAÇÕES ESTATÍSTICAS ENTRE MDES SOBREPOSTOS	77

## LISTA DE SIGLAS

ALS - *Airborne Laser Scanning*

AML - Acurácia Máxima Local

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

CGIAR-CSI - *Consortium for Spatial Information*

DLR - *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

DML - Delineação Mínima Legível

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico

EMQ - Erro médio quadrático

GDEM - *Global Digital Elevation Model*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT - Índice de Posição Topográfica

ITU - Índice topográfico de umidade

LiDAR - *Light Aetection And Ranging*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDT - Modelo Digital do Terreno

NGA - *National Geospatial-Intelligence Agency*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SIR-C - *Spaceborne Imaging Radar-C*

TIN - *Triangulated Irregular Network* (Rede Triangular Irregular)

UGI - União Geográfica Internacional

X-SAR - *X-Band Synthetic Aperture Radar*

## SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	11
LISTA DE SIGLAS.....	12
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
2.1 GEOMORFOMETRIA.....	23
2.1.1 Modelos Digitais de Elevação.....	25
2.2 ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO.....	30
2.2.1 Classificações digitais de formas do relevo.....	30
2.2.2 Modelagem digital aplicada a mapeamentos geomorfológicos.....	33
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1 ELABORAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO.....	39
3.1.1 Definição da resolução horizontal do Modelo Digital do Terreno.....	40
3.2 CÁLCULO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....	41
3.3 TESTES DE QUALIDADE DO MDT.....	45
3.3.1 Testes de variação da resolução horizontal do MDT.....	45
3.3.2 Testes comparativos com MDEs globais.....	47
3.4 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÕES PREEXISTENTES DE FORMAS DO RELEVO.....	49
3.4.1 Método do Índice de Posição Topográfica.....	49
3.4.2 Método de classificação de Hammond/Dikau.....	52
3.5 CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOLÓGICA SUPERVISIONADA.....	54
3.5.1 Parâmetros do mapa de unidades de relevo.....	55
3.5.2 Parâmetros do mapa de formas de vertente.....	56
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
4.1 INTERPRETAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....	58

4.2 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DO MDT.....	68
4.2.1 Avaliação comparativa entre os MDTs <i>Topogrid</i> .....	68
4.2.2 Avaliação comparativa com MDEs globais.....	76
4.3 CLASSIFICAÇÕES PREEXISTENTES DE FORMAS DE RELEVO.....	79
4.3.1 Índice de Posição Topográfica.....	79
4.3.2 Classificação de Hammond/Dikau.....	86
4.4 MAPAS DA CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOLÓGICA SUPERVISIONADA.....	100
4.4.1 Mapa de unidades de relevo.....	101
4.4.2 Mapa de formas de vertente.....	108
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>112</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme Guerra e Cunha (1994), o grande potencial na aplicação de mapeamentos geomorfológicos está no seu interfaceamento com os projetos de planejamento da ocupação humana, com vistas à economia dos recursos investidos, mediante a prevenção de problemas futuros.

No Brasil, devido à carência de mapeamentos de base em escala de detalhe, à extensão territorial e às dificuldades de acesso em porções específicas, a modelagem digital emerge como importante ferramenta auxiliar recente para estudos sobre o relevo (VALERIANO, 2004). Como consequência há a necessidade de buscar novas metodologias de mapeamento com os recursos técnicos e operacionais disponíveis no momento.

O desenvolvimento das geotecnologias nas últimas décadas, inseridas no contexto da análise digital do relevo em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), configura um cenário favorável para a aplicação de técnicas paramétricas que objetivam a mensuração, identificação e classificação de feições e unidades do relevo a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), que podem contribuir significativamente e dar suporte aos trabalhos de cartografia geomorfológica.

A geomorfometria, entendida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre, vem sendo explorada em diversas vertentes de aplicação do conhecimento geomorfológico. Pike *et al.* (2009) citam que as operações fundamentais em geomorfometria são pautadas pela extração de parâmetros e objetos a partir de MDEs.

Destaca-se que a utilização crescente de MDEs e subprodutos derivados — sobretudo na última década, devido à disponibilidade cada vez maior de bases de dados em formato digital e também de *softwares* que contemplam ferramentas de análise digital do relevo —, para fins diversos e com inúmeras aplicações, em muitos trabalhos comumente vem sendo empregada de modo arbitrário e sem critérios metodológicos.

Nesse cenário, o presente trabalho aborda o potencial de aplicação da análise digital do relevo para a elaboração de produtos cartográficos que podem subsidiar a construção de mapas geomorfológicos. Pelo fato da geomorfometria ter se desenvolvido muito recentemente, devido à facilidade de acesso e manipulação



de dados topográficos, o rigor metodológico é destacado em todas as etapas da dissertação.

O trabalho está dividido em quatro etapas principais: a) testes metodológicos dos Modelos Digitais de Elevação para reconhecimento prévio das limitações da modelagem; b) aplicação de duas propostas de classificação geomorfométrica digital existentes (Hammond/Dikau e Índice de Posição Topográfica); c) adaptação e formulação de uma classificação geomorfométrica para a confecção dos mapas de formas de relevo e de formas de vertente; d) discussão dos resultados a partir do conhecimento geomorfológico local.

Referente ao estado da arte da cartografia geomorfológica no estado do Paraná destacam-se os estudos iniciados na década de 1940 com publicações pioneiras de Maack (1981) e recentemente ampliados com a publicação do Mapeamento Geomorfológico (morfoestrutural/morfoescultural) do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI *et al.*, 2006), sendo o primeiro levantamento geomorfológico sistemático para todo o estado. Este mapeamento seguiu o método de taxonomia do relevo proposto por Ross (1992) e, conforme a escala adotada (1:250.000), atingiu o nível de representação dos três primeiros táxons: unidades morfoestruturais, unidades morfoesculturais e subunidades morfoesculturais.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.1.1 Objetivo geral

- Realização do mapeamento de unidades de relevo e formas de vertente a partir de técnicas geomorfométricas e classificação digital semiautomatizada na porção central da Serra do Mar paranaense.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar MDEs disponíveis para a área de estudo e os atributos topográficos resultantes em aspectos quantitativos e qualitativos, a fim de compreender as limitações das etapas de modelagem;

- Testar a aplicação de classificações digitais de formas do relevo preexistentes, apoiadas na combinação de atributos topográficos derivados de MDEs;
- Criar regras de classificação específicas para a área de estudo, objetivando o mapeamento de unidades de relevo e formas de vertente adequado à escala 1:25.000;
- Avaliar o potencial de aplicação dos produtos obtidos em relação ao 4º e 5º nível taxonômico da proposta de Ross (1992);

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O recorte definido como área de estudo (FIGURA 1), localizado na porção leste do Estado do Paraná e compreende quatro cartas topográficas na escala 1:25.000. Abrange parcialmente quatro municípios paranaenses: Morretes, Guaratuba, Paranaguá e, numa pequena porção a sudeste, Matinhos. Totaliza área de 686,2 km<sup>2</sup>.

Pelo fato do presente estudo testar a aplicação e formulação de propostas metodológicas, a adoção da área se deve à complexidade geomorfológica da região serrana, que confere diversidade de formas, à base cartográfica na escala 1:25.000 disponível publicamente (em contrapartida à base 1:50.000 para o restante do estado) e principalmente devido ao conhecimento prévio da área evidenciado por projetos e estudos realizados (SILVEIRA *et al.*, 2012; SILVEIRA *et al.*, 2013) e levantamentos preliminares.

Em termos geomorfológicos a área de estudo se situa na porção central da Serra do Mar Paranaense, margeada a norte e a sul pela Planície Litorânea. São duas importantes unidades de paisagem que conferem ao recorte uma gama variada de feições e processos geomorfológicos atuantes.

Conforme o mapeamento geomorfológico do estado do Paraná, ilustrado na área de estudo pela figura 2C, a Serra do Mar configura-se como uma cadeia de montanhas marginal do Primeiro Planalto Paranaense, separando-o da Planície Litorânea, com cimos elevados de até 1.800 metros de altitude, sustentada por litologias diversas, quase sempre metamórficas de alto grau como migmatitos, gnaisses e xistos e mais raramente quartzitos, frequentemente associados com rochas intrusivas relacionadas a ciclos metamórficos mais jovens.

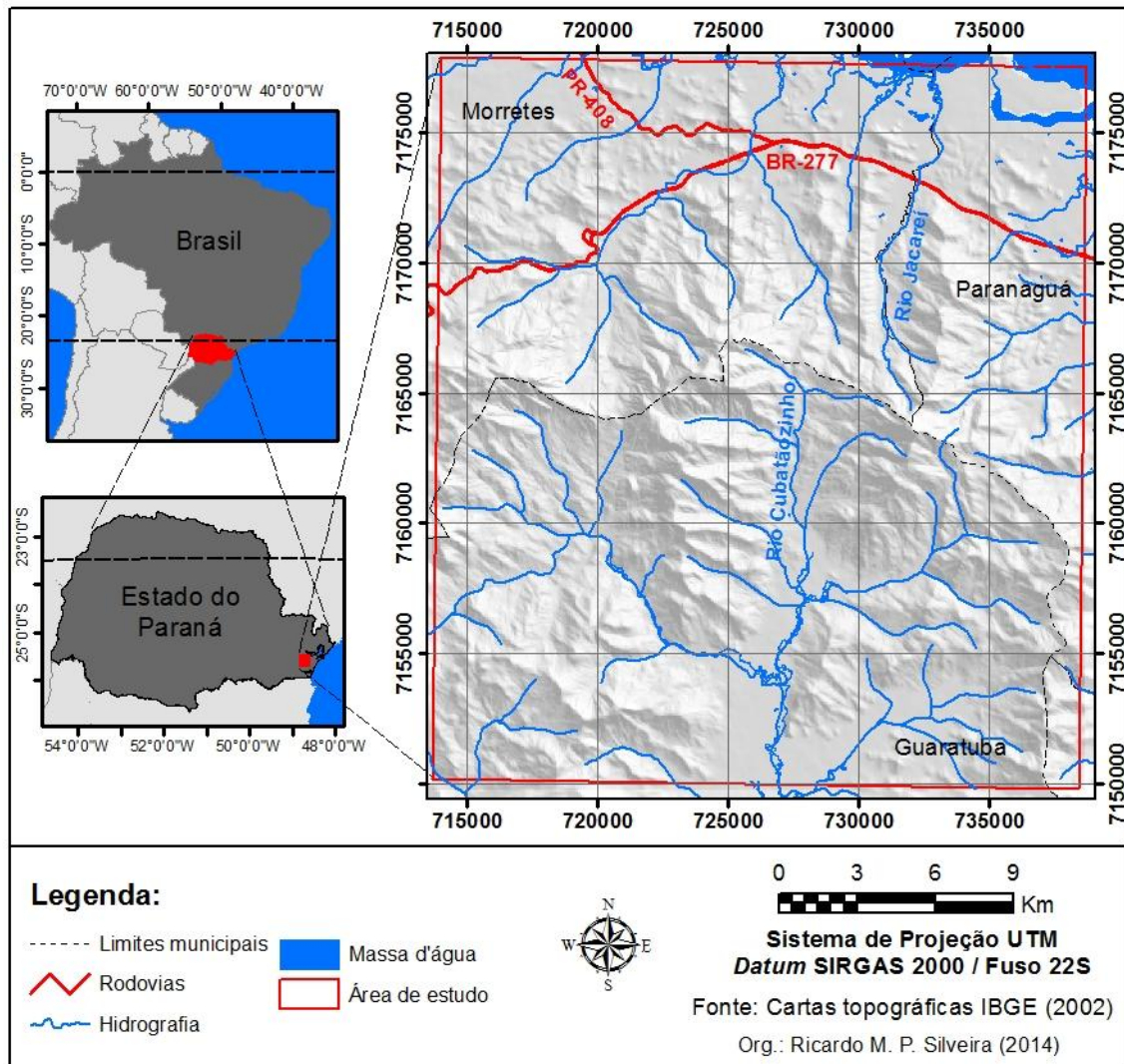


FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Almeida e Carneiro (1998) definem a Serra do Mar como um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1000 quilômetros de extensão entre o estado do Rio de Janeiro até o norte de Santa Catarina, configurando-se como uma cadeia de montanhas no estado do Paraná. Além disso, os autores destacam que a ampla variedade de tipos litológicos do embasamento exposto remete à complexa história registrada entre o Pré-cambriano e o Eopaleozóico, que deu origem a diversas associações migmatíticas, metamórficas e também aos inúmeros complexos ígneos.

Sobre os processos geomorfológicos atuantes, destaca-se que a Serra do Mar é:

uma região submetida a altas pluviosidades médias anuais e episódios prolongados de chuvas, envolvem intensa participação de movimentações

de massa. Os escorregamentos e deslocamentos de solos e rochas acontecem mormente ao longo de superfícies planas e inclinadas. As descontinuidades, como juntas e falhas antigas, são aproveitadas, pela água e pelos lentos processos de denudação associados, para desenvolver em profundidade as massas de solo e rocha decomposta que acabam sendo afetadas pela atividade erosiva incessante (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998, p. 142).

Quanto à planície litorânea, Bigarella (2001) cita que esta unidade é constituída de formações arenosas, paludais terrestres, manguezais (paludais marinhos) e nas proximidades do complexo cristalino por terrenos de aluviões terrestres. A altitude em sua maior extensão varia de zero a 10 m sobre o nível do mar, sendo que nos pontos mais interiores atinge 20 m de altitude. A planície formou-se durante os dois últimos ciclos transgressivo/regressivos do Quaternário, relacionados aos ciclos glaciais (ANGULO, 2004).

De acordo com o Zoneamento do Litoral Paranaense (IPARDES, 1989), a área de estudo compreende sete sub-regiões geomórficas (FIGURA 2D), denominadas Unidades Ambientais Naturais: a) Serras, com relevo energético e grandes desníveis; b) Áreas coluviais, sendo as partes baixas das vertentes onde ocorreram a acumulação de sedimentos; c) Planícies aluviais, áreas compostas por diversas formas elaboradas pela ação fluvial; d) Morros, caracterizados como elevações sustentadas por rochas do embasamento que sobressaem da planície; e) Colinas, caracterizadas como elevações de perfil convexo e relevo mais suave que os morros; f) Planícies de restingas, formadas por uma sucessão de cordões litorâneos; g) Mangues, áreas sujeitas aos fluxos e refluxos das marés.

Em mapeamentos sistematizados de escala regional (1:250.000), as principais unidades geológicas (MINEROPAR, 2001) apresentadas para a área de estudo são os Complexos Metamórficos Indiferenciados, Granítico-Gnáissicos, Gnáissico-Migmatíticos, as Formações Alexandra e Guaratubinha, o Suíte Álcali-Granito e os Sedimentos Recentes (FIGURA 2A), enquanto as principais unidades de solo descritas pela EMBRAPA (2008) são os Argissolos, Cambissolos, Espodossolos, Gleissolos e Afloramentos Rochosos (FIGURA 2B).

O clima da planície costeira paranaense, segundo a classificação de Köppen, é tipo Cfa (Clima Subtropical Úmido - Mesotérmico), enquanto nas elevações da Serra do Mar a partir de 700m de altitude passa a ser classificado como tipo Cfb (Subtropical Úmido - Mesotérmico com verão fresco), com precipitações mais abundantes devido ao efeito orográfico. As chuvas apresentam-se de forma

concentrada nos meses de verão e as menores médias pluviométricas são registradas nos meses de inverno (VANHONI e MENDONÇA, 2008).

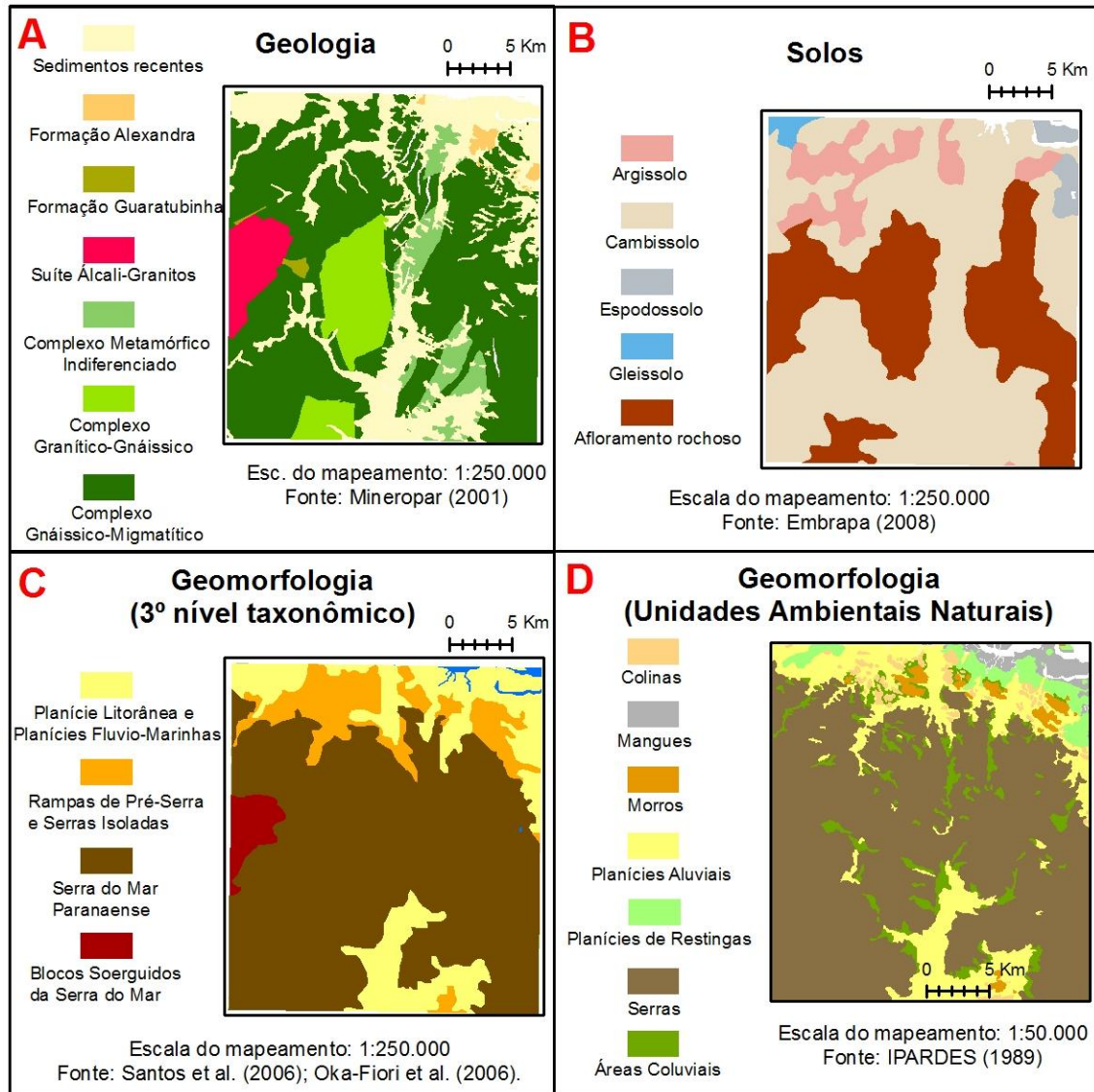


FIGURA 2 - CARACTERIZAÇÃO GEOPEDOLÓGICA DE GRANDES COMPARTIMENTOS HOMOGÊNEOS NA ÁREA DE ESTUDO

A sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor (FIGURA 3), afluente do rio Jacareí, localizado na Serra da Prata, município de Paranaguá/PR, foi adotada como recorte ilustrativo para aproximação visual nos produtos cartográficos obtidos, pois a sub-bacia é o local da área de estudo que concentra os principais pontos de controle e registros de campo. Além disso, alguns testes metodológicos que por limitações operacionais não puderem ser realizados para a área de estudo em sua totalidade foram aplicados nesse recorte individualizado. A sub-bacia possui 1,9km<sup>2</sup>,

representando apenas 0,3% da área de estudo total, cujo gradiente altimétrico contempla o intervalo entre 18 e 910 metros de altitude.

A adoção deste recorte realçado ante a área de estudo total está associada aos dados e informações disponíveis a partir de levantamentos realizados em trabalhos anteriores (SILVEIRA *et al.*, 2013), que favorecem a compreensão e análise dos resultados obtidos. Também está associada à sua configuração geomorfológica recente e à relevância da compreensão de processos geomórficos atuantes na bacia, já que a região da Serra da Prata foi uma das mais atingidas pelos movimentos de massa ocorridos no dia 11 de março de 2011, caracterizando-se como um evento de grandes proporções que acarretou severas modificações na paisagem e muitos danos para a população local.

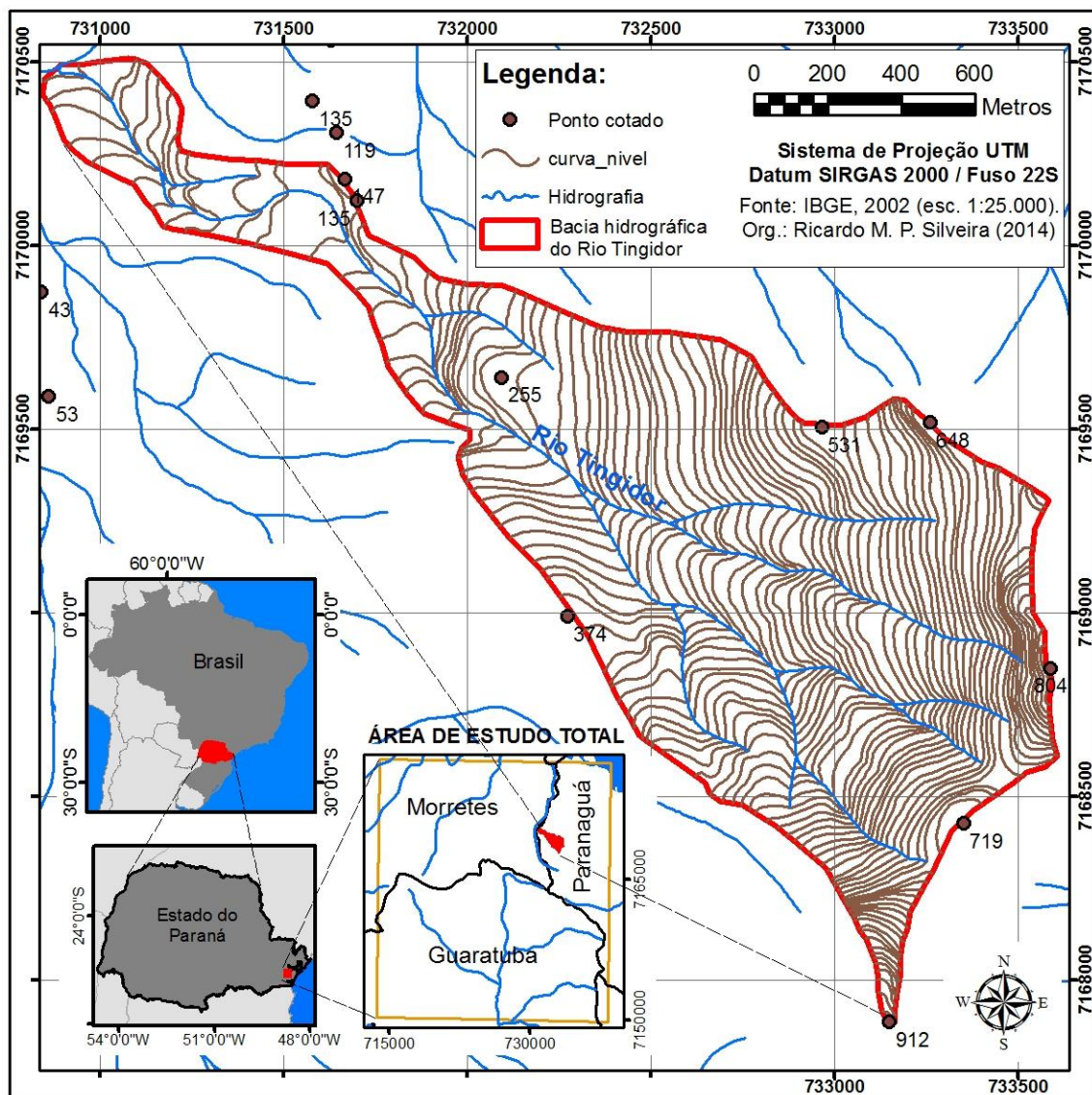


FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TINGIDOR.

Conforme Silveira *et al.* (2013) o volume de material desprendido dos escorregamentos consistiu em blocos de rocha, solo e troncos de árvores, arrancados e transportados seguindo caminho de fluxo nos segmentos convergentes das vertentes. Nesse processo de transporte, foram remobilizados depósitos pretéritos, na forma de solos e blocos de rocha. Todo o volume de material fluiu em direção às planícies, com o material mais grosseiro tendendo a se depositar na saída dos canais, formando cones de detritos, enquanto o material em suspensão atingiu grandes extensões do vale, levando a inundações e formação de depósitos de sedimentos finos em expressiva área da planície aluvial.

A sub-bacia do rio Tingidor está localizada na margem direita da bacia principal do rio Jacareí, cujas vertentes concentraram os escorregamentos devido ao acentuado desnível altimétrico e às altas declividades sustentadas pelos corpos graníticos do terço superior da Serra do Mar. Nesse contexto, dada a intensidade do evento, a região ainda encontra-se instável e suscetível ao desprendimento de material e sua remobilização.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GEOMORFOMETRIA

Pike *et al.* (2009, p. 12) citam que a geomorfometria, como é conhecida atualmente, começou a se desenvolver como campo científico com as contribuições de Barnabé Brisson (1777–1828), Carl Gauss (1777–1855), Alexander von Humboldt (1769–1859) entre outros, no século XVIII.

Para Miliaresis (2008), o desenvolvimento da geomorfometria envolve a altimetria, com as mensurações das montanhas no século XIX, a fisiografia, que corresponde à escala regional de estudos geomorfológicos no início do século XX, e por fim a análise do terreno, ligada ao estudo sistemático dos elementos relacionados à origem, cronologia e composição de distintas unidades de relevo.

Em trabalho clássico, Chorley (1957) define a geomorfometria como a ciência que trata da geometria da paisagem e das tentativas de descrever quantitativamente a superfície da Terra. O termo geomorfometria foi utilizado pela primeira vez por Alexander Von Humboldt, em 1849 (DIKAU *et al.*, 1995).

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento da informática e das geotecnologias de modo geral, a geomorfometria passou a ser definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (PIKE, 2000; RASEMANN *et al.*, 2004), uma moderna abordagem analítico-cartográfica para representar a topografia da Terra (TOBLER, 2000) e também um campo interdisciplinar que envolve a matemática, as geociências e, mais recentemente, a ciência da computação (PIKE *et al.*, 2009).

A geomorfometria tem como enfoque a extração de medidas descritivas (parâmetros) e feições da superfície terrestre (objetos) (MARK e SMITH, 2004; WILSON, 2012). Evans (1972) define a primeira, que trata a superfície de modo contínuo, como geomorfometria geral, e a segunda, que contempla a discretização da superfície, como geomorfometria específica.

A geomorfometria específica é aplicada para descrever formas de relevo discretas, como vulcões, dunas, montanhas e envolve decisões arbitrárias e subjetivas na etapa de quantificação desses conceitos. A geomorfometria geral, por sua vez, é aplicada para descrever a superfície contínua e proporciona a base para a comparação quantitativa de paisagens distintas qualitativamente, podendo



também auxiliar na adaptação de métodos de análise da superfície utilizados em outros campos além da geomorfologia (MACMILLAN e SHARY, 2009).

Conforme Bolongaro-Crevenna *et al.* (2005), a geomorfometria considera a relação entre a forma do relevo e os parâmetros numéricos usados para descrevê-la. Assim, um objetivo fundamental da geomorfometria é extrair assinaturas de processos geomorfológicos (PIKE, 1988). Estas assinaturas são extraídas em diferentes escalas espaciais de MDEs e descrevem a complexidade das formas de relevo como a síntese dessas impressões individuais (SCHMIDT e ANDREW, 2005).

Há uma variedade de termos empregados para definir as representações numéricas da superfície. Como apontam Pike *et al.* (2009), na literatura comumente encontram-se definições como modelagem do terreno (LI *et al.*, 2005), análise do terreno (WILSON e GALLANT, 2000) e ciência da topografia (MARK e SMITH, 2004).

Quanto aos descritores quantitativos, ou medições, das formas da superfície, Pike *et al.* (2009) citam que estes são referenciados, principalmente, como parâmetros de formas de relevo (SPEIGHT, 1968), variáveis morfométricas (SHARY *et al.*, 2002), informação do terreno (MARTINONI, 2002), atributos do terreno (PENNOCK, 2003), atributos geomorfométricos (SCHMIDT e DIKAU, 1999), atributos topográficos (WILSON e GALLANT, 2000) e atributos do relevo (IPPOLITI *et al.*, 2005; SIRTOLI *et al.*, 2008).

A descrição numérica da geometria da superfície, associada à relação entre topografia, processo e forma, possibilita a criação de um conjunto consistente de regras para a delimitação de unidades do relevo (ROMSTAD, 2001). Estas regras, por sua vez, potencializam o entendimento dos processos atuantes na paisagem e, desse modo, possuem grande potencial no apoio ao processo de ocupação e gestão do uso da terra, como um instrumento auxiliar no planejamento físico-ambiental (SILVEIRA, 2010).

Sobre a temática, destacam-se obras abrangentes publicadas recentemente que embasaram todas as etapas deste trabalho: *Terrain analysis: principles and applications* (WILSON e GALLANT, 2000), *Digital Terrain Modelling: Acquisition, Manipulation and Applications* (EL-SHEIMY *et al.*, 2005), *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology* (LI *et al.*, 2005), *Digital Terrain Modelling: Development and Applications in a Policy Support Environment* (PECKHAM e JORDAN, 2007), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* (SHAN e

TOTH, 2008), *Advances in Digital Terrain Analysis. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (ZHOU *et al.*, 2008) e, principalmente, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* (HENGL e REUTER, 2009).

### 2.1.1 Modelos Digitais de Elevação

Segundo Evans *et al.* (2009), o primeiro conceito de Modelo Digital de Elevação foi descrito por Miller e Laflamme (1958) no Instituto de Tecnologia de Massachussetts, mas foi pouco utilizado até a década de 1960 devido às limitações dos computadores, já que os primeiros MDEs eram preparados com base em fotogrametria.

Segundo Dikau *et al.* (1995), os primeiros Modelos Digitais de Elevação surgiram e se desenvolveram somente a partir das décadas de 1960 e 1970. Atualmente muitos algoritmos e ferramentas específicas para MDEs são implementados em *softwares* (comerciais ou de distribuição gratuita) de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (SEIJMONSBERGEN *et al.*, 2011).

Conforme apontam Pike *et al.* (2009) e Li *et al.* (2005), há muitas divergências conceituais entre os termos empregados, sobretudo entre “Modelo Digital de Elevação” e “Modelo Digital do Terreno”, sendo que muitas vezes ambos são empregados como sinônimos. Para outros, como Zhou *et al.* (2008), o MDE se refere à representação da elevação unicamente, enquanto o MDT é uma derivação que contém a representação de atributos ou objetos. A análise digital do terreno, por sua vez, seria o processo de transformação do MDE para MDT.

Entretanto, no presente trabalho adotou-se a interpretação de El-Sheimy *et al.* (2005). Segundo os autores, os **Modelos Digitais do Terreno (MDTs)** se referem aos valores altimétricos do terreno desconsiderando quaisquer objetos na superfície (como árvores ou construções). Já os **Modelos Digitais de Elevação (MDEs)** se referem aos valores altimétricos contemplando os objetos existentes na superfície. De modo geral, para se referir a um conjunto de modelos digitais, sejam do terreno ou de elevação, adotou-se a designação MDE.

Conforme Nelson *et al.* (2009), há três fontes de dados para a construção de MDEs: a) Técnicas de levantamento de campo, com a aquisição de pontos precisos de latitude, longitude e elevação (x, y, z); b) Mapas topográficos existentes, com a

derivação de curvas de nível, drenagens, lagos e pontos de elevação; c) Sensoriamento remoto, com a interpretação de fotografias aéreas ou de imagens adquiridas de satélites, com destaque para a fotogrametria (métodos estereocópicos), radares e, mais recentemente, levantamentos *Laser*.

Dentre os MDEs globais disponibilizados gratuitamente destacam-se o Aster GDEM (cujos valores de elevação são obtidos a partir do par estereoscópico de imagens do infravermelho próximo geradas no subsistema VNIR por meio de dois sensores a bordo do satélite Terra), com resolução de 30 metros, e o MDE derivado do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), com duas resoluções: um segundo de arco (aproximadamente 30 metros) e três segundos de arco (aproximadamente 90 metros).

O projeto SRTM advém de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália. A missão usou o mesmo instrumento utilizado em 1994 no programa *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR), a bordo do ônibus espacial *Endeavour*. Porém o arranjo foi projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de interferometria. A cobertura foi feita em 80% da área terrestre do planeta, entre latitudes 60° N e 56° S (VALERIANO, 2004).

Quanto às novas tecnologias, destacam-se os levantamentos a *laser* que produzem MDEs com resoluções inferiores a 1 metro. LiDARs (*Light Detection And Ranging*) são sensores ativos que enviam e recebem energia produzida pelo próprio sensor. Os sensores LiDAR emitem frequências, isto é, centenas de milhares de pequenos pulsos de energia por segundo. Estes pulsos iluminam porções muito pequenas da superfície e uma porção dessa energia é refletida de volta ao sensor (LANG *et al.*, 2010).

Segundo Nascimento Junior *et al.* (2006), o interesse pelo sistema LiDAR aerotransportado (*Airborne Laser Scanning - ALS*), que vem evoluindo e sendo melhorado, tem aumentado significativamente. Os ALS disponibilizados comercialmente utilizam o mesmo princípio: uma aeronave sobrevoa uma região e o equipamento *laser* efetua uma varredura no chão em direção perpendicular à direção do voo, determinando a distância ao terreno. Esta distância é calculada como uma função do tempo exigido pelo raio *laser* para ir e voltar do equipamento até o terreno, na velocidade da luz.

Segundo Evans (2012), com a resolução detalhada do LiDAR muitos problemas antigos desaparecem e novos surgem. A avaliação do erro é alterada radicalmente: erros técnicos tornaram-se pequenos, mas erros de definição permanecem. Em escalas de detalhe a natureza antrópica deve ser aceita, e ao invés de serem removidas, tais características devem ser identificadas e delimitadas como formas de relevo específicas, analisadas separadamente do restante da superfície.

Quanto às aplicações, Hengl e MacMillan (2009) citam que o principal argumento de utilização de MDEs para o mapeamento e modelagem de paisagens naturais é a variedade de medidas, mensurações e objetos que podem ser derivados pela análise automatizada dos dados de elevação. Essa análise pode extrair, de modo rápido e consistente, muitos parâmetros ou objetos que podem ser considerados como análogos diretos dos critérios utilizados pelo intérprete manual para identificar e delinear objetos aplicados à pedologia, ecologia, geomorfologia e geologia.

Além disso,

um fator importante a favorecer a inclusão do relevo na identificação e na análise de sistemas terrestres advém de recentes coletas de dados topográficos por técnicas de sensoriamento remoto. A utilização de bases topográficas digitais obtidas por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a carência de mapeamentos, sobretudo na África, Oceania e América do Sul. Áreas cobertas com mapeamentos sistemáticos são também beneficiadas à medida que a preparação do material cartográfico para o processamento em SIG demandam mão-de-obra e tempo expressivos nos custos de um projeto de pesquisa (VALERIANO, 2004, p. 19).

Os MDEs também são muito utilizados por prover coberturas contínuas para áreas extensas e com relativo baixo custo, sendo que a computação digital automatizada fornece as medidas de formas da superfície, de contexto, de padrões e de textura que podem ser utilizados como substitutos para os critérios considerados na interpretação visual de imagens ou fotografias aéreas (HENGL e MACMILLAN, 2009).

Franklin e Peddle (1987) definem cinco parâmetros básicos pertencentes à parametrização do relevo: a) elevação, cujo gradiente topográfico representa a taxa de mudança da altitude com relação aos eixos X (linhas) e Y (colunas); b) declividade, sendo um ponto do terreno definido pelo ângulo entre o vetor normal a

uma superfície e um na vertical no mesmo ponto; c) orientação (aspecto), formada por um ângulo existente entre o vetor direcionado ao norte e outro projetado horizontalmente na superfície do mesmo ponto; d) curvatura, definida como a taxa de mudança de declividade num determinado ponto derivada da altitude, ou seja, é a mudança de declividade entorno de um ponto, representada pela concavidade/convexidade do relevo; e) rugosidade, distinguindo áreas uniformes de terrenos rugosos. Os autores destacam que há diversos métodos para obter medidas de rugosidade, sendo aconselhável calculá-la de forma independente dos outros parâmetros, reduzindo, assim, informação redundante.

Os métodos paramétricos são aqueles que utilizam os parâmetros da distribuição, ou uma estimativa destes, para o cálculo de sua estatística. Normalmente, estes testes são mais rigorosos e possuem mais pressuposições para sua validação.

Quanto à variação do tamanho da resolução do MDE no cálculo de atributos topográficos, destaca-se que a média e o desvio padrão dos valores de declividade são reduzidos drasticamente quando mensurados a partir de grades grosseiras (EVANS, 1972 e 2012; DENG *et al.*, 2007). Raaflaub e Collins (2006) demonstraram que, em muitos algoritmos empregados, a sensibilidade dos erros de declividade diminui à medida que a análise de vizinhança aumenta.

Shary *et al.* (2002), a partir de uma análise sobre os efeitos da resolução espacial dos MDEs em atributos topográficos, demonstraram que as variáveis locais declividade, aspecto e curvaturas são muito sensíveis às mudanças da resolução da grade, sendo que as segundas derivadas (curvaturas) são mais sensíveis que as primeiras derivadas (declividade e aspecto). Segundo os autores, a declividade média tende a zero conforme a resolução horizontal aumenta. A resolução, portanto, deve ser apropriada para capturar e descrever as feições da superfície de interesse para uma aplicação particular (MACMILLAN e SHARY, 2009).

Smith *et al.* (2006) realizaram testes para avaliar o impacto da resolução dos MDEs para mapeamento de solos e chegaram à conclusão de que nem sempre os modelos digitais de elevação com melhor resolução são os que produzem a melhor acurácia. Neste estudo, com finalidade específica, as resoluções consideradas satisfatórias variam de 24 a 48 metros, dependendo da morfologia local. Estudo similar foi publicado por Cavazzi *et al.* (2013).

São muitos os trabalhos que se propõem a analisar e validar MDEs, como Chagas *et al.* (2010), que comparou MDT Topogrid, Aster GDEM e SRTM, Miceli *et al.* (2011), contemplando SRTM, Aster GDEM e Topodata e Mouratidis *et al.* (2010), que avaliou as quatro versões disponíveis do SRTM. Ludwig e Schneider (2006). realizaram testes de validação da acurácia MDE SRTM X-SAR para aplicações em modelagem hidrológica, destacando os bons resultados em áreas planas e a grande variação dos valores em áreas montanhosas, especialmente devido pelo sombreamento do radar em vertentes orientadas para noroeste.

Numa abordagem mais ampla, quanto aos tipos de modelos e possibilidades de derivações, Hengl e MacMillan (2009) definem duas abordagens principais para a “modelagem da realidade” que variam em função da exatidão do conhecimento prévio e da quantidade de componentes aleatórios no modelo.

A primeira abordagem considera os denominados modelos de estimação direta (modelos determinísticos), que tem como pressuposto que os produtos são determinados por um conjunto finito de entradas e seguem exatamente alguma lei física conhecida. Nesse caso, o algoritmo (fórmula) do modelo é conhecido e a evolução do produto pode ser prevista com exatidão.

A segunda abordagem contempla os modelos de estimação indireta, que são utilizados quando a relação entre as feições de interesse e o meio físico é complexa a ponto de não poder ser modelada com exatidão, no entanto pode ser empregado algum tipo de estimador indireto. Neste caso, as variáveis de entrada, os algoritmos aplicadas para a obtenção de produtos derivados e a significância dos componentes aleatórios no sistema não são conhecidos.

Na abordagem de estimação indireta Heng e MacMillan (2009) citam duas possibilidades: modelos estatísticos puros e modelos heurísticos.

Nos modelos estatísticos, diferentemente dos modelos determinísticos, as variáveis de entrada e os coeficientes/regras utilizados para derivar os produtos são desconhecidos. Há, pelo menos, quatro grupos de modelos estatísticos utilizados para predições espaciais com o auxílio de atributos topográficos (MCBRATNEY *et al.*, 2003; BISHOP e MINASNY, 2005): a) Modelos baseados em classificação, utilizados em variáveis discretas, com destaque para a lógica *booliana* e lógica *fuzzy*; b) Modelos baseados em árvores, utilizados quando há uma mescla de variáveis contínuas e discretas, com destaque para a árvore de decisões; c) modelos de regressão, que assumem uma relação linear entre as variáveis de

entrada e os produtos derivados, cuja relação pode ser mensurada por técnicas iterativas de ajuste de dados (redes neurais e similares); d) modelos geoestatísticos híbridos, que consideram a combinação de técnicas dos outros modelos citados.

Por fim, Hengl e MacMillan (2009, p. 440) evidenciam que “cada um dos modelos estatísticos podem ser igualmente aplicáveis para mapeamento e podem exibir vantagens e desvantagens”.

Conforme Li *et al.* (2005), são sete os critérios que garantem o sucesso de um modelo:

- Acurácia – Os produtos derivados são corretos?
- Realismo – O modelo é baseado em hipóteses realísticas?
- Precisão – Os produtos derivados são as melhores previsões imparciais possíveis?
- Robustez – O modelo é mais sensível aos erros nos dados?
- Generalidade – O modelo é aplicável a vários estudos de caso e escalas?
- Aplicabilidade – Os produtos derivados são úteis e podem ajudar usuários a solucionar problemas?
- Simplicidade – O modelo é o mais simples possível (menor número de parâmetros)?

## 2.2 ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO

### 2.2.1 Classificações digitais de formas do relevo

Para Dikau (1990, p. 232) a extração de unidades e formas do relevo a partir de MDEs demanda a definição de alguns tópicos fundamentais: o caráter e a definição do espaço geomorfológico; como as propriedades desse espaço podem ser descritos em termos de atributos geométrico-topológicos; se essas propriedades podem ser relacionadas aos processos correspondentes em dimensões multiescalares; como esses atributos podem ser delimitados adequadamente a partir dos MDEs.

Conforme Evans *et al.* (2003), a extração semiautomatizada de formas de relevo é uma das áreas de pesquisa mais ativas no campo da geomorfologia recente

MacMillan e Shary (2009) destacam cinco procedimentos principais para a organização de classificações de formas de relevo de modo automatizado:

- Estabelecimento do(s) objeto(s) espacial(is) da classificação;
- Especificação e computação das variáveis de entrada;
- Extração ou criação de regras de classificação;
- Aplicação das regras de classificação;
- Estimativa e avaliação da acurácia.

Os autores ainda citam que todos os métodos de predição automática de classes de entidades espaciais geomórficas são baseadas na criação de regras para o estabelecimento de relações preditivas entre as variáveis de entrada (ou estatísticas das variáveis de entrada) e as classes resultantes.

A potencialidade de utilização de métodos paramétricos se deve, entre outros fatores, ao provimento de uma base mais objetiva e uniforme para a identificação de sistemas terrestres. Estes requerem a medição e o mapeamento de variáveis do relevo como altitude, declividade, curvaturas vertical e horizontal, orientação de vertentes etc., que são combinados para identificar elementos de terreno e estes em padrões de terreno (VALERIANO, 2004).

Dentre os trabalhos pioneiros no processamento sistemático de dados de elevação para computar classificações de formas do relevo ou para descrever a morfologia quantitativamente, destacam-se: Strahler (1956), Speight (1968, 1977), Evans (1972), Mark (1975a, 1975b) e Peucker e Douglas (1975), que lançaram as bases para o desenvolvimento da geomorfometria nas décadas posteriores.

Recentemente, a integração dos SIGs com ferramentas de análise estatística em MDEs tem aumentado o poder analítico da geomorfologia moderna (EVANS *et al.*, 2009).

Diversos autores apontam as vantagens da classificação geomorfológica digital (WOOD, 1996; MACMILLAN *et al.*, 2000; WILSON e GALLANT, 2000; ROMSTAD, 2001; VALERIANO, 2004; DRAGUT e BLASCHKE, 2006; IWAHASHI e PIKE, 2007; KLINGSEISEN *et al.*, 2007; GROHMANN *et al.*, 2008; PIKE *et al.*, 2008; SAADAT *et al.*, 2008; WILSON, 2012; SILVEIRA *et al.*, 2012), sobretudo em função da redução da subjetividade na classificação manual, facilidade na comparação dos resultados derivados de diferentes conjuntos de dados e da redução do tempo de delimitação das unidades.



Algumas das propostas que obtiveram destaque na identificação de feições e unidades do relevo foram os trabalhos de: Wood (1996), com a classificação de seis feições elementares (picos, cumes, depressões, canais, desfiladeiros e planos); Weiss (2001), com o índice de posição topográfica; Iwahashi e Pike (2007), com uma classificação não-supervisionada – com desdobramentos e novas aplicações em Bolongaro-Crevenna *et al.* (2005) e Dragut e Blaschke (2006) –, e Dikau *et al.* (1991), numa classificação hierárquica de formas de relevo, com aplicações realizadas por Brabyn (1998), Gallant *et al.* (2005), Hrvatin e Perko (2009) e Barka *et al.* (2011).

A proposta de Iwahashi e Pike (2007) consiste numa classificação não-supervisionada de formas do terreno por uma árvore de decisões com base nos valores médios (geral, da metade inferior e do quarto inferior) de três variáveis morfométricas (declividade, convexidade e textura) a partir de um MDE e suas propriedades estatísticas. A proposta se apoia no conceito de assinatura geométrica (PIKE, 1988). A proposta foi aplicada em três escalas: a) o distrito de Shimukappu, localizado no Japão, com um MDE de 55m; b) Japão, com MDE de 270m; c) Toda a extensão continental do planeta Terra, utilizando MDE de 1km.

Este método foi aplicado por Silveira *et al.* (2014) para todo o estado do Paraná, utilizando os atributos topográficos declividade, plano de curvatura e fluxo acumulado obtidos a partir do MDE SRTM.

Ehsani e Quiel (2008) desenvolveram um método semiautomático utilizando uma rede neural não-supervisionada para analisar feições geomorfométricas e elementos de formas de relevo. O algoritmo empregado para a classificação resultou em dez classes caracterizadas pela posição morfométrica, cujo MDE de referência foram as imagens SRTM. Em trabalho posterior (EHSANI e QUIEL, 2009) os autores acrescentaram dados das imagens *Landsat* no método para identificar elementos de paisagem.

Ressalta-se que os métodos supervisionados de classificação geomorfométrica requerem o conhecimento prévio dos processos e feições da área de estudo para a definição dos limiares dos atributos topográficos que podem ser utilizados para a delimitação de unidades do relevo. Por outro lado, os métodos não-supervisionados de classificação geomorfométrica são baseados na abordagem estatística com a finalidade de encontrar a menor área geomorfométrica homogênea (MIHAI, 2012).

Muitas das tentativas de particionar formas de relevo em elementos de formas de relevo a partir de MDEs foram realizadas com base na análise da forma local da superfície. Peucker e Douglas (1975) utilizaram a janela de células 3x3 para o reconhecimento automatizado de formas elementares, diferenciando: depressões (todos os vizinhos maiores), picos (todos os vizinhos menores), canais (vizinhos de lados opostos maiores), cristas (vizinhos de lados opostos menores), desfiladeiros (vizinhos de lados opostos maiores e de lados ortogonais menores) e planos (sem variação de vizinhança). Essa abordagem é melhor ilustrada por Wood (1996), que demonstrou como os procedimentos podem ser aplicados para extrair e classificar objetos morfológicos com o cálculo realizado em janelas de vizinhança cada vez maiores.

Evans (2012) atenta para a problemática recente da aplicação de MDEs com resoluções detalhadas, como o LiDAR, para fins geomorfológicos específicos. Sobre a remoção de objetos (seja vegetação ou construções) na superfície em MDEs e seus impactos na dinâmica natural, exemplifica que “se os edifícios são construções sólidas feitas de rochas ou tijolos, eles vão obstruir o fluxo d’água” (p. 97).

Devido a essa grande variedade de métodos e aplicações, destacam-se duas questões, levantadas por Evans *et al.* (2003), pertinentes às classificações de formas de relevo: deve-se primeiramente aplicar a classificação não-supervisionada e então construir a legenda, ou vice-versa? Deve-se limitar o número máximo de classes ou deve-se tentar organizá-las em uma hierarquia?

### 2.2.2 Modelagem digital aplicada a mapeamentos geomorfológicos

Com a utilização crescente de MDEs, muitos mapas geomorfológicos “clássicos” passaram a ser utilizados para validar formas de relevo derivadas em ambiente informatizado. Nessa perspectiva, o conhecimento heurístico pode ser convertido em regras de cálculos matemáticos que tornam possível a derivação de mapas da superfície terrestre por qualquer usuário final de modo automático ou semiautomático (SEIJMONSBERGEN *et al.*, 2011).

Para Evans *et al.* (2003) os conceitos básicos em geomorfologia incluem a magnitude e frequência de processos, escalas espaciais de formas e processos, escalas temporais, equilíbrio e sucessão histórica, relações entre processos internos

e externos e camadas de sedimentos, muitos dos quais envolvem a utilização de mensurações geomorfométricas cada vez mais frequentes a partir de MDEs.

Dikau (1989) evidencia a importância da aplicação de SIGs como ferramenta para a gerência e análise numérica de dados visando o mapeamento geomorfológico, criando o termo “sistemas de informações geomorfológicas”, também utilizado por Minar e Evans (2008). Conforme o autor, o projeto de mapeamento geomorfológico deve considerar:

- Armazenamento de dados espaciais digitalizados das diferentes camadas de informação do mapa;
- Avaliação dos dados para fins de aplicação e para outras disciplinas geocientíficas;
- Simplificação do processo de mapeamento pela modelagem da superfície;
- Modelagem de processos geomorfodinâmicos a partir de objetos quantificados.

Segundo Evans (2012), os mapeamentos morfológicos automatizados são menos complexos que os mapeamentos geomorfológicos, pois estes envolvem a morfogênese, sendo que muitas vezes são necessários trabalhos de campo com análises geofísicas, sedimentológicas e estratigráficas.

De acordo com Minar e Evans (2008) a definição de formas de relevo deve maximizar a homogeneidade interna e as diferenças externas, sendo a base teórica para segmentação da superfície pautada em três axiomas: a) a forma da superfície pode ser analisada de maneira contínua; b) em dada escala, a superfície pode, no entanto, exibir descontinuidades (limites naturais dos objetos geomórficos); c) as descontinuidades são resultado dos processos morfogenéticos, muitos dos quais influenciados pela gravidade.

Conforme Minar e Evans (2008), a modelagem digital do relevo tem como grande desafio suprir a falta de precisão e objetividade dos mapeamentos geomorfológicos tradicionais.

Evans *et al.* (2009) listam as principais aplicações de MDEs no campo da geomorfologia no século XXI em quatro agrupamentos:

- Interpretação visual de MDEs: identificação e delimitação manual de feições geomorfológicas;

- Identificação e quantificação automatizada de propriedades geomorfológicas: extração e utilização de atributos topográficos (declividade, aspecto, curvaturas) para a análise geomorfológica e detecção de estruturas;
- Extração automatizada de estruturas hidrológicas/denudacionais: extração de redes de drenagem, talwegues e divisores de água, reconhecimento de padrões de drenagem etc.;
- Extração automatizada de formas de relevo: extração de formas e elementos de relevo utilizando algoritmos semi-automatizados ou automatizados.

Evans (2012) cita uma importante diferença entre a escola norte-americana e britânica em relação às demais escolas europeias, como a germânica, na concepção dos mapas geomorfológicos. Segundo o autor, os mapas geomorfológicos multicoloridos, com muitas camadas sobrepostas indicando a morfografia, morfometria, gênese, processos atuais, materiais (litologia, estrutura) e cronologia, característicos de muitos países que adotam os pressupostos germânicos, são demasiadamente complexos, com extensas legendas e de difícil leitura. Por esse motivo, a escola britânica e norte-americana tem como preocupação a elaboração de mapas simplificados com foco no agrupamento de formas de relevo relacionadas.

Segundo Dikau (1989, p. 74), “o mapeamento geomorfológico pautado em aspectos quantitativos deve proporcionar uma classificação objetiva das feições do relevo formadas por componentes definíveis”.

As classificações automatizadas de formas de relevo quase sempre representam uma tentativa de replicar algum sistema previamente concebido de classificação e mapeamento manual de formas de relevo. Muitos desses sistemas manuais consideram modelos semânticos que tentam contemplar conceitos considerados importantes pelo pesquisador utilizando a formulação de critérios subjetivos para a diferenciação de classes (MACMILLAN e SHARY, 2009).

Dehn *et al.* (2001) citam que as formas de relevo são descritas principalmente sob duas perspectivas: baseado unicamente na sua geometria ou baseado nas semânticas usadas para expressar e capturar modelos conceituais mentais subjetivos.

As dificuldades semânticas de definir precisamente, por exemplo, os limites de uma montanha ou de vales associados (onde começam e onde terminam) foram discutidos por Mark e Smith (2004) e Smith e Mark (2006), que destacaram a

imprecisão em áreas de transição de unidades conceituadas com nomenclaturas específicas.

Para Evans (2012), cada estudo geomorfológico deve indicar especificamente as definições de formas de relevo. Termos como “pequeno, curto, levemente ou fraco” são relativos, não absolutos, e formas de relevo não podem ser definidas de modo relativo (contextual), seja para mapeamento ou mensurações. Assim, as definições operacionais são necessárias para todas as formas de relevo em que a geomorfometria específica é aplicada. Segundo o autor, a necessidade por transparência é axiomática e muitos mapeamentos geomorfológicos omitem as definições operacionais dos termos utilizados.

Nessa perspectiva, “algumas feições têm múltiplas identidades: todos os grandes vulcões são montanhas, e alguns vulcões são ilhas, mas muitas ilhas e montanhas não são vulcões” (EVANS, 2012, p. 97).

No tocante à problemática da escala geomorfológica e taxonomia do relevo amparada sob aspectos quantitativos, destacam-se os trabalhos de Dikau (1989; 1990), cuja proposta taxonômica se baseia na subdivisão hierárquica de unidades do relevo que podem ser descritas com seus atributos topológicos e geométricos. A tipologia é estritamente baseada no conceito de homogeneidade dos atributos geométricos, em quatro níveis: formas de faceta (unidades de relevo com declividade, aspecto e curvatura homogêneos), formas de elemento, formas de relevo e associação de formas de relevo, sendo que cada nível pode ser sintetizado pela combinação das formas do nível imediatamente abaixo.

Segundo o autor, “essas hierarquias são fundamentais para a definição da estrutura conceitual e do conhecimento sistemático de um sistema de informações geomorfológicas, que pode prover métodos adequados para a modelagem e análise geomorfológica” (DIKAU, 1990, p. 230). O esquema é ilustrado pela FIGURA 4.

Uma possibilidade apresentada é a agregação de unidades de menor nível de grandeza (microformas) para unidades de maior nível de grandeza (mesoformas). Isso inclui um problema geral dos sistemas organizados hierarquicamente. Geralmente, o caráter geométrico de um objeto de nível maior (elementos de mesorelevo: vertentes) não pode ser definido adequadamente pela soma das unidades de nível menor (associação de microformas: deslizamentos). Isso significa que os níveis hierárquicos de grandeza representam objetos independentes que não

são, entretanto, mutuamente excludentes e que são funcionalmente correlacionados (DIKAU, 1990).

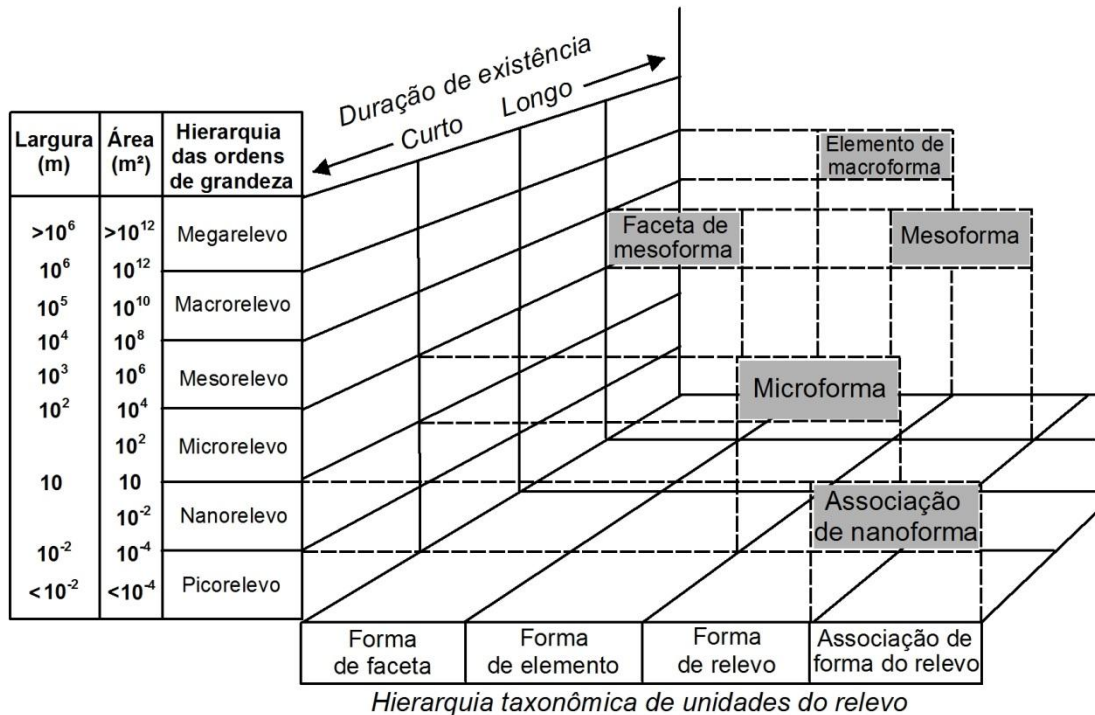


FIGURA 4 - HIERARQUIA TAXONÔMICA GEOMORFOLÓGICA DE DIKAU (1990).  
Fonte: Adaptado de Dikau (1990).

O autor destaca ainda que “tipologicamente, as formas de relevo são mais flexíveis e mais subjetivas. Sua delimitação em campo muitas vezes é pragmática e pode ser influenciada pelos pressupostos teóricos do pesquisador” (DIKAU, 1989, p. 54).

Mais recentemente, no contexto das hierarquias geomorfológicas aplicadas à análise digital do relevo, MacMillan *et al.* (2004) atenta para a necessidade atual de relacionar os modelos a um nível hierárquico espacial, com relações e interações especificadas. Assim, a fusão efetiva de SIG e modelagem ambiental exige melhoras na capacidade de implementação automática, aplicações específicas, modelos de dados espaciais complexos e para a atribuição de atributos descritivos às entidades espaciais resultantes. A proposta dos autores é ilustrada pelo QUADRO 1, tendo como pontos positivos a inclusão de escalas de referência e também de resoluções aproximadas indicadas para a utilização de MDEs.

A proposta de MacMillan *et al.* (2004) é focada em quatro níveis hierárquicos:  
a) Elementos de forma de relevo, que representam o nível mais baixo da hierarquia

e contempla unidades morfológicas de restrita variedade morfológica/morfométrica; b) Tipos de forma de relevo, representando conjuntos de elementos de formas de relevo com padrões característicos; c) Sistemas fisiográficos, definidos pela aglomeração de tipos de relevo similares e adjacentes; d) Regiões fisiográficas, sendo o maior nível hierárquico, que são equivalentes às “ecorregiões”.

<b>Escala apropriada</b>	<b>Resolução do MDE</b>	<b>Nome proposto</b>
1:5.000.000 a 1:10.000.000	10 x 10 km	Província fisiográfica
1:1.000.000 a 1:5.000.000	1 x 1 km	Região fisiográfica
1:500.000 a 1:1.000.000	500 x 500 m	Distrito fisiográfico
1:125.000 a 1:500.000	100 x 100 m	Sistema fisiográfico
1:50.000 a 1:125.000	25 x 25 m	Tipo de forma de relevo
1:10.000 a 1:50.000	10 x 10 m	Não nomeado e indefinido
1:5.000 a 1:10.000	5 x 5 m	Elemento de forma de relevo
1:1.000 a 1:5.000	1 x 1 m	Não nomeado e indefinido

QUADRO 1 - HIERARQUIA DE UNIDADES DO RELEVO.

Fonte: Adaptado de MacMillan *et al.* (2004)

Quanto aos problemas de escala, Schoorl e Veldkamp (2005) citam que a paisagem é um sistema de quatro dimensões: comprimento, largura, altura e tempo, sendo que cada uma dessas dimensões apresenta diferentes comportamentos em distintas escalas de trabalho (HENGL e MACMILLAN, 2009). Diversos autores apontam a dependência de escala em MDEs e, conseqüentemente, de classificações derivadas (GALLANT e HUTCHINSON, 1997; SCHMIDT e ANDREW, 2005; GROHMANN e SAWAKUCHI, 2013).

As relações entre variáveis geomorfométricas e processos físicos são significativos em escalas específicas (DRAGUT *et al.*, 2009). A escala apropriada, por sua vez, tem de ser definida em relação ao conjunto de dados e à finalidade do estudo. Para a obtenção da escala “correta” em estudos relacionais, as análises estatísticas têm sido propostas como meio de explorar as relações entre as variáveis-alvo (como solo, vegetação, tipo de relevo etc) e as variáveis do terreno em várias escalas.

Como exemplo dessas preocupações, em trabalho recente Hani *et al.* (2012) propuseram o cálculo da rugosidade da superfície por análise multiescalar, com um algoritmo que considera que as principais unidades fisiográficas têm distintas distribuições de curvatura e, portanto, apresentam distintas características de rugosidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos executados estão agrupados em três etapas principais (FIGURA 5), descritas a seguir: a) elaboração do Modelo Digital do Terreno, geração dos atributos topográficos derivados e aplicação de testes quantitativos e qualitativos em diversos MDEs (*Topogrid*, SRTM e Aster GDEM); b) classificação geomorfométrica parametrizada com base em duas propostas preexistentes (Índice de Posição Topográfica e Classificação de Hammond/Dikau); c) elaboração dos mapas de unidades de relevo e de formas de vertente a partir de regras de classificação supervisionadas amparadas pelas etapas anteriores.

Todos os procedimentos foram realizados em ambiente SIG com auxílio do software *ArcGIS* versão 10.1 (ESRI, 2012) e ferramentas, extensões ou *scripts* nele inseridos.

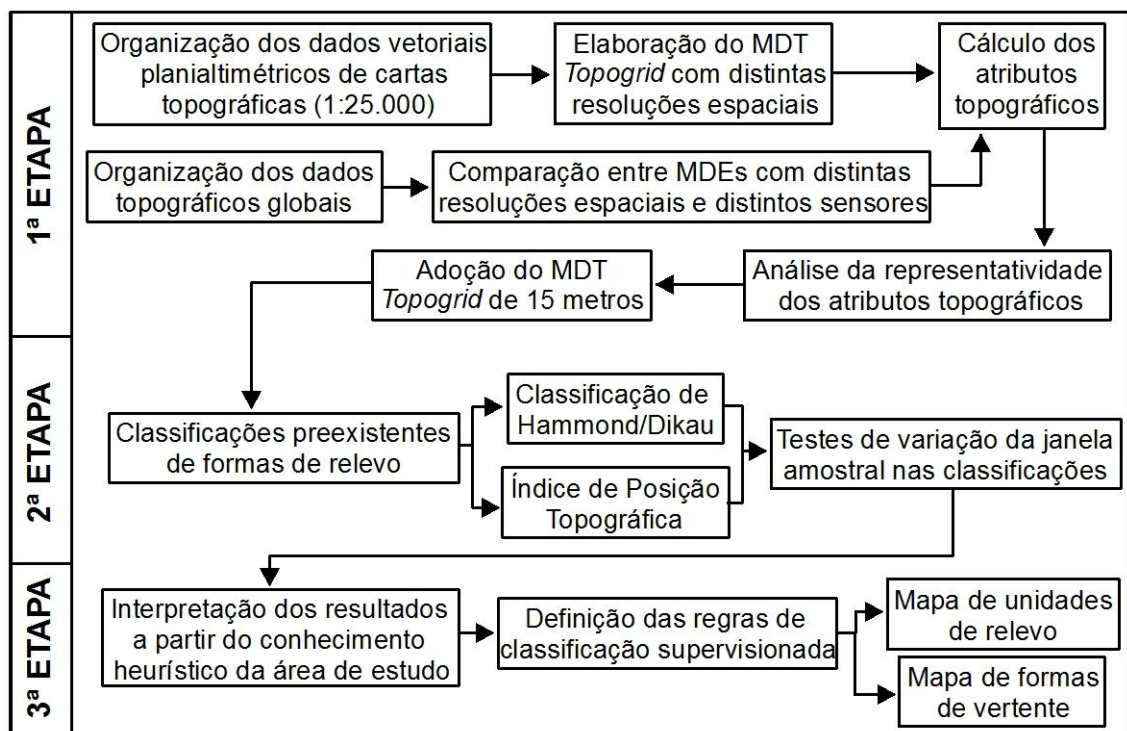


FIGURA 5 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO SIMPLIFICADO

#### 3.1 ELABORAÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO

O Modelo Digital do Terreno foi gerado com base no método de interpolação denominado *Topogrid*, baseado na proposta de Hutchinson (1988; 1989), a partir de



dados planialtimétricos vetoriais (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia). As cartas topográficas utilizadas foram: 2858-1 NE, 2858-1 SE, 2858-2 NO, 2858-2 SO e estão na escala 1:25.000. São derivadas do Programa Proteção da Floresta Atlântica - Paraná (PRÓ-ATLÂNTICA), elaborado pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG, 2002).

O *Topogrid* difere de outros métodos de interpolação, como a Rede Triangular Irregular (ou TIN, *triangulated irregular network*), por gerar MDTs hidrologicamente corretos e com grade regular. O *Topogrid* remove automaticamente erros espúrios (como picos ou depressões), facilitando, assim, o cálculo de canais, divisores d'água e áreas de contribuição.

De acordo com Marcuzzo *et al.* (2011), o *Topogrid* interpola os dados topográficos em uma grade regular, de modo iterativo, gerando grades sucessivamente menores, minimizando a soma de uma de penalização de rugosidade (*roughness penalty*) e a soma dos quadrados dos resíduos (diferenças das elevações medidas e calculadas pela função).

### 3.1.1 Definição da resolução horizontal do Modelo Digital do Terreno

A etapa de definição da resolução horizontal (*pixel*) do MDT foi pautada em contribuições de Hengl (2006), sob duas perspectivas: cartográfica, considerando a escala original da base de dados, e topográfica, considerando as características morfométricas locais e complexidade do terreno.

A abordagem cartográfica é amparada pela proposta de delimitação mínima legível (DML) e de acurácia máxima local (AML), de Vink (1975). Ambas são definidas em função da menor área a ser mapeada. A DML, que indica os valores máximos, é referenciada como 2,5mm no mapa, resultando em resoluções grosseiras. Já a AML, que indica os valores mínimos, varia de 0,25mm a 0,1mm, resulta em resoluções mais finas referentes à menor área discernível num mapa. Como valor intermediário, Hengl (2006) recomenda a utilização de 0,5mm como referência para determinação do tamanho do *pixel*. A equação 1 ilustra esses conceitos:

$$p = FE \cdot 0,0005 \quad (\text{equação 1})$$

onde  $p$  é a resolução do *pixel*, em metros,  $FE$  é o fator de escala e o valor numérico (já convertido em metros) se refere ao valor pretendido para a DML ou AML.

Assim, considerando a escala 1:25.000 das cartas topográficas utilizadas para a criação do MDT, o tamanho recomendado para o *pixel* varia entre 62,5m (DML), 6,25m-2,5m (AML) e 12,5m (valor intermediário recomendado).

Complementarmente também foi aplicada a abordagem que contempla as características topográficas locais. Nessa proposta, a resolução horizontal do MDT pode ser estimada numa relação entre as curvas de nível e área, sendo:

$$p = \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad (\text{equação 2})$$

onde  $p$  é o tamanho do pixel,  $A$  é a área total e  $\sum l$  é o somatório do comprimento de todas as curvas de nível do recorte avaliado.

Com a finalidade de precisar a adoção do tamanho do *pixel* em função das porções do terreno que apresentam maior rugosidade, Hengl (2006) propõe que este mesmo cálculo seja efetuado em um recorte com 5% da área total no local onde há maior concentração de curvas de nível.

A aplicação da fórmula para todo o recorte definido como área de estudo apontou que o *pixel* deve ter a resolução espacial de 16,3m. Quando aplicada na porção de 5% da área total com maior número de inflexões observadas (topos da Serra da Prata), o valor obtido foi de 10,4m.

Com base nos resultados obtidos por estas distintas proposições, o tamanho de *pixel* adotado para o MDT foi definido em 15x15 metros, totalizando uma grade de 1671x1875 *pixels* para toda a área de estudo.

### 3.2 CÁLCULO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Para a caracterização geomorfométrica da área de estudo e definição das variáveis a serem utilizadas nas classificações posteriores de formas e segmentos de relevo, foram calculados oito atributos topográficos a partir do MDT: declividade, aspecto, plano de curvatura, perfil de curvatura, relevo sombreado, acumulação de

fluxo (atributos topográficos primários) e índice topográfico de umidade e índice de posição topográfica (atributos topográficos secundários), sendo que este último será apresentado de forma mais detalhada sequencialmente (item 3.4.1 Método do Índice de Posição Topográfica).

Os atributos topográficos primários, determinados diretamente a partir do MDT, foram calculados a partir de uma janela móvel 3x3 *pixels* (FIGURA 6), cujos algoritmos contemplam a análise de vizinhança.

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$

FIGURA 6 – JANELA DE VIZINHANÇA 3X3.

A declividade (medida de inclinação da superfície) e o aspecto (orientação das vertentes) foram calculados a partir das variáveis direcionais de Horn (1981), conforme equações 6 e 7:

$$f_x = \frac{[(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)]}{8L} \quad (\text{equação 3})$$

$$f_y = \frac{[(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)]}{8L} \quad (\text{equação 4})$$

onde  $f_x$  é o gradiente leste-oeste da janela 3x3,  $f_y$  é o gradiente norte-sul e  $L$  é o espaçamento da grade regular (15 metros).

A partir desses valores, a declividade é calculada conforme equações 8 e 9:

$$\text{Declividade em porcentagem} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (\text{equação 5})$$

$$\text{Declividade em graus} = \frac{180 \sqrt{fx^2 + fy^2}}{\pi} \quad (\text{equação 6})$$

E o aspecto é definido por:

$$\text{Direção em graus} = \text{ATan } 2(fx - fy) \left( \frac{180}{\pi} \right) \quad (\text{equação 7})$$

Já o plano e perfil de curvatura (também denominados na literatura como curvatura vertical e horizontal ou curvatura em planta e perfil) também foram calculados a partir da vizinhança 3x3, conforme variáveis direcionais de Zevenbergen e Thorne (1987):

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$$A = \frac{\left[ \frac{(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9) - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)}{4} + Z_5 \right]}{L^4} \quad (\text{equação 9})$$

$$B = \frac{\left[ \frac{(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9) - (Z_2 - Z_8)}{4} \right]}{L^3} \quad (\text{equação 10})$$

$$C = \frac{\left[ \frac{(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9) - (Z_4 - Z_6)}{4} \right]}{L^3} \quad (\text{equação 11})$$

$$D = \frac{\left[ \frac{(Z_4 + Z_6)}{2} - Z_5 \right]}{L^2} \quad (\text{equação 12})$$

$$E = \frac{\left[ \frac{(Z_2 + Z_8)}{2} - Z_5 \right]}{L^2} \quad (\text{equação 13})$$

$$F = \frac{(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)}{4L^2} \quad (\text{equação 14})$$

$$G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L} \quad (\text{equação 15})$$

$$H = \frac{(Z_2 - Z_8)}{2L} \quad (\text{equação 16})$$

$$I = Z_5$$

$L = \text{Tamanho do pixel}$

Com base nesse polinômio, o plano de curvatura é calculado por:

$$\text{Plano de curvatura} = -2 \left( \frac{H^2D - GHF + G^2E}{G^2 + H^2} \right) \quad (\text{equação 17})$$

E o perfil de curvatura por:

$$\text{Perfil de curvatura} = -2 \left( \frac{G^2D - GHF + H^2E}{G^2 + H^2} \right) \quad (\text{equação 18})$$

A acumulação de fluxo, por sua vez, foi quantificada pelo método denominado D-infinito, algoritmo proposto por Tarboton (1997) e com auxílio da extensão *TauDEM* versão 5.1. Neste método, o ângulo de direção do fluxo é determinado como a direção mais íngreme considerando as oito facetas triangulares formadas em uma janela 3x3 *pixels* (FIGURA 7).

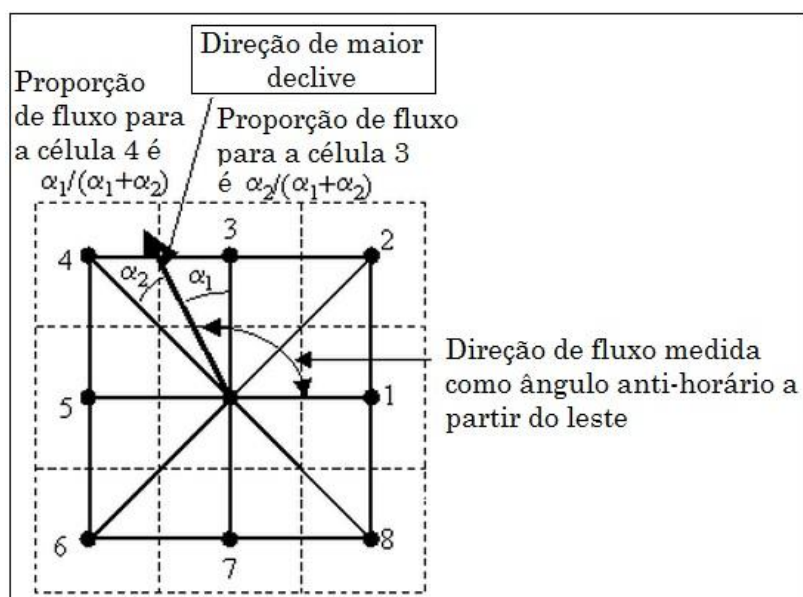


FIGURA 7 – MÉTODO D-INFINITO PARA CÁLCULO DA DIREÇÃO DE FLUXO.

A acumulação de fluxo é obtida pela contribuição de cada *pixel* somado às contribuições do entorno mais elevado, conforme ângulo da direção de fluxo. Assim, o fluxo de cada um dos *pixels* drena para algum de seus vizinhos, tendo esse valor somado ao seu.

O índice topográfico de umidade (atributo topográfico secundário) é composto pela acumulação de fluxo dividido pela tangente da declividade:

$$ITU = \ln \left( \frac{A_c}{\tan\beta} \right) \quad (\text{equação 19})$$

onde  $\ln$  é o logaritmo natural,  $A_c$  é a área de contribuição (acumulação de fluxo) e  $\tan\beta$  é a tangente da declividade mensurada em graus.

### 3.3 TESTES DE QUALIDADE DO MDT

Com o intuito de ilustrar os efeitos ocasionados pelas diferenças entre distintos Modelos Digitais de Elevação, tanto na altimetria quanto nos atributos topográficos derivados, foram realizados testes estatísticos comparativos primeiramente entre quatro MDTs *Topogrid*, variando apenas o tamanho do *pixel* (5, 10, 15 e 20 metros), e, num segundo momento, testes entre o *Topogrid* e MDEs globais amplamente utilizados (SRTM e Aster GDEM) que apresentam resoluções mais grosseiras.

No primeiro caso, devido às limitações de processamento, os testes foram feitos apenas para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor, e no segundo, para toda a área de estudo.

#### 3.3.1 Testes de variação da resolução horizontal do MDT

Como demonstrado anteriormente (item 3.1.1), mesmo com a adoção de critérios metodológicos para a definição da resolução horizontal do MDT há muita divergência entre os valores indicados.

Os testes apontaram que a resolução apropriada para a área de estudo varia, predominantemente, de 6 a 16 metros. Dessa forma, para fins comparativos, foram gerados quatro MDTs com *pixels* de 5, 10, 15 e 20 metros, considerado um intervalo confiável em que todas as resoluções são amparadas pelos critérios metodológicos aplicados.

Os quatro MDTs foram gerados pelo mesmo processo de interpolação (*Topogrid*) e a partir da mesma base cartográfica digitalizada (dados vetoriais das cartas topográficas 1:25.000). Em seguida, para fins de teste, foram calculados os atributos topográficos: declividade, plano de curvatura e índice topográfico de umidade, para cada um dos quatro MDTs.

Os produtos obtidos foram comparados entre si (valores contínuos, célula a célula) por uma correlação linear, objetivando estabelecer estimativas estatísticas para a compreensão da sensibilidade das variáveis morfométricas em relação à mudança de resolução espacial. Devido à diferença de resolução dos MDTs, nas comparações prevaleceu o tamanho da menor célula.

Por fim, para avaliar os efeitos da variação do tamanho do *pixel* em atributos topográficos discretizados, unicamente para a declividade (reclassificada conforme proposta da EMBRAPA (2006)) foi aplicada uma matriz de confusão (SILVEIRA, 2010; SILVEIRA *et al.*, 2012), também denominada matriz de erros.

A matriz de confusão permite o cálculo do percentual de concordância entre os modelos pelo valor da exatidão global. Também possibilita avaliar quanto determinada unidade foi subestimada ou superestimada, pois os erros de omissão descrevem a acurácia de determinada classe mapeada, enquanto a taxa de erros de inclusão indica quanto uma classe foi superestimada.

Devido ao fato da correlação ser entre modelos e não ter a validação pelo “real”, em todos os casos o MDT com menor tamanho de *pixel* foi adotado como referência para a determinação dos erros de inclusão e omissão.

Os erros de inclusão correspondem aos *pixels* que mesmo pertencendo à outra classe foram incluídos na classe mapeada, conforme a equação 20:

$$Ein(i) = \frac{SC(i) - M(i,i)}{SC(i)} \quad (\text{equação 20})$$

onde  $Ein(i)$  significa o erro de inclusão,  $SC(i)$  é a soma parcial da coluna  $i$  da matriz de erros e  $M(i,i)$  são os elementos da diagonal da linha  $i$  da matriz de erros.

Os erros de omissão, por sua vez, são *pixels* que pertencem à classe que se deseja mapear, mas que foram erroneamente classificados como sendo de outra, ou seja, foram omitidos da classe, como mostra a equação 21:

$$Eom(i) = \frac{SL(i) - M(i,i)}{SL(i)} \quad (\text{equação 21})$$

onde  $Eom(i)$  significa o erro de omissão,  $SL(i)$  é a soma parcial da linha  $i$  da matriz de erros e  $M(i,i)$  são os elementos da diagonal da linha  $i$  da matriz de erros.

Já a exatidão global, valor que definirá a concordância entre os mapeamentos, é definida computando o número de *pixels* concordantes, conforme equação 22:

$$EG = \frac{nc}{nt} \quad (\text{equação 22})$$

onde  $nc$  corresponde ao número de *pixels* corretamente classificados e  $nt$  ao número de *pixels* total da matriz.

### 3.3.2 Testes comparativos com MDEs globais

Além da comparação de MDTs gerados a partir da mesma base e com o mesmo método de processamento, também foram realizados testes entre o MDT *Topogrid* 15x15m (empregado como referência neste trabalho) em relação a outros MDEs obtidos por distintos métodos de extração de altimetria.

Os outros cinco MDEs empregados na análise comparativa foram:

- MDE SRTM, banda C, versão 2, com resolução de 3 arcos de segundo (aproximadamente 90 metros), obtidos pelo programa *Spaceborne Imaging Radar* a bordo do ônibus espacial Endeavour e disponibilizados pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), dos Estados Unidos da América.



- MDE SRTM, banda C, versão 4, criado por diversos pós-processamentos (como MDEs auxiliares e técnicas de interpolação) tendo como referência as versões prévias dos dados SRTM e disponibilizado pelo *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI), dos Estados Unidos da América.
- MDE SRTM, banda X, obtido pelo programa *Synthetic Aperture Radar* a bordo do ônibus espacial Endeavour, com resolução espacial de 30 metros e disponibilizado pela *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR), a Agência Aeroespacial Alemã.
- MDE do acervo Topodata, que consiste no pós-processamento dos dados SRTM por *krigagem* e com resolução reamostrada para 30 metros, com resultados publicados por Valeriano (2004) e Valeriano e Rossetti (2011) e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Brasil.
- Aster GDEM, versão 2, com resolução de 30 metros, cujos valores de elevação são obtidos a partir do par estereoscópico de imagens do infravermelho próximo geradas no subsistema VNIR por meio de dois sensores a bordo do satélite Terra. Os dados são disponibilizados pela *Japan Space Systems*.

Os MDEs foram comparados estatisticamente entre si, contemplando a hipsometria e declividade, com o cálculo do erro máximo (subtração de dois MDEs), erro médio e desvio padrão.

Seguidamente, utilizaram-se os 3077 pontos cotados da base cartográfica alocados no recorte da área de estudo como pontos de controle (adequados à escala 1:25.000) para calcular o erro médio quadrático (equação 23) dos MDEs:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum(z_i - z_t)^2}{n}} \quad (\text{equação 23})$$

onde  $z_i$  é o valor altimétrico da célula,  $z_t$  é o valor do ponto de controle e  $n$  é o número total de pontos do controle.

### 3.4 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÕES PREEXISTENTES DE FORMAS DO RELEVO

#### 3.4.1 Método do Índice de Posição Topográfica

O Índice de Posição Topográfica (IPT), proposto por Weiss (2001), é derivado de um algoritmo que mensura a diferença entre a elevação de um ponto central ( $Z_0$ ) e a média da elevação ( $\bar{Z}$ ) ao seu redor com um raio predeterminado (R). Wilson e Gallant (2000, p. 74), apresentando a mesma equação, definem o cálculo como Diferença da Elevação Média:

$$IPT = Z_0 - \bar{Z} \quad (\text{equação 24})$$

Onde a média da elevação é calculada por:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i \in R} z_i \quad (\text{equação 25})$$

A análise de vizinhança pode ser feita por uma janela circular (empregada no presente trabalho), anular (proposta original), retangular ou irregular.

Os valores positivos obtidos pelo IPT representam locais que são mais elevados que a média do seu entorno, caracterizando, por exemplo, as cristas. Os valores negativos, por sua vez, representam os locais mais rebaixados em relação à sua vizinhança, caracterizando vales ou depressões. Já os valores próximos a zero obtidos pelo IPT representam as superfícies de declive constante, destacando-se as áreas planas (FIGURA 8).

Weiss (2001) apresenta duas propostas de discretização dos valores contínuos do IPT para a determinação de classes morfológicas, ambas considerando os valores de desvio padrão. A primeira considera o particionamento de uma única matriz resultante com valores de IPT e resulta em 6 classes possíveis (TABELA 1). Já a segunda é classificada a partir de duas matrizes com variação no tamanho do raio de análise da vizinhança, uma de mais detalhe e outra mais generalizada, resultando em até 10 classes (TABELA 2).

Como o IPT é diretamente afetado pelo fator de escala, os valores resultantes do índice (e, conseqüentemente, as classificações derivadas), variam de acordo com os valores de raio adotados. A etapa de definição do raio de análise da vizinhança, portanto, conforme apontam Tagil e Jenness (2008) e De Reu *et al.* (2013), deve estar associada ao nível de detalhe pretendido pelo pesquisador.

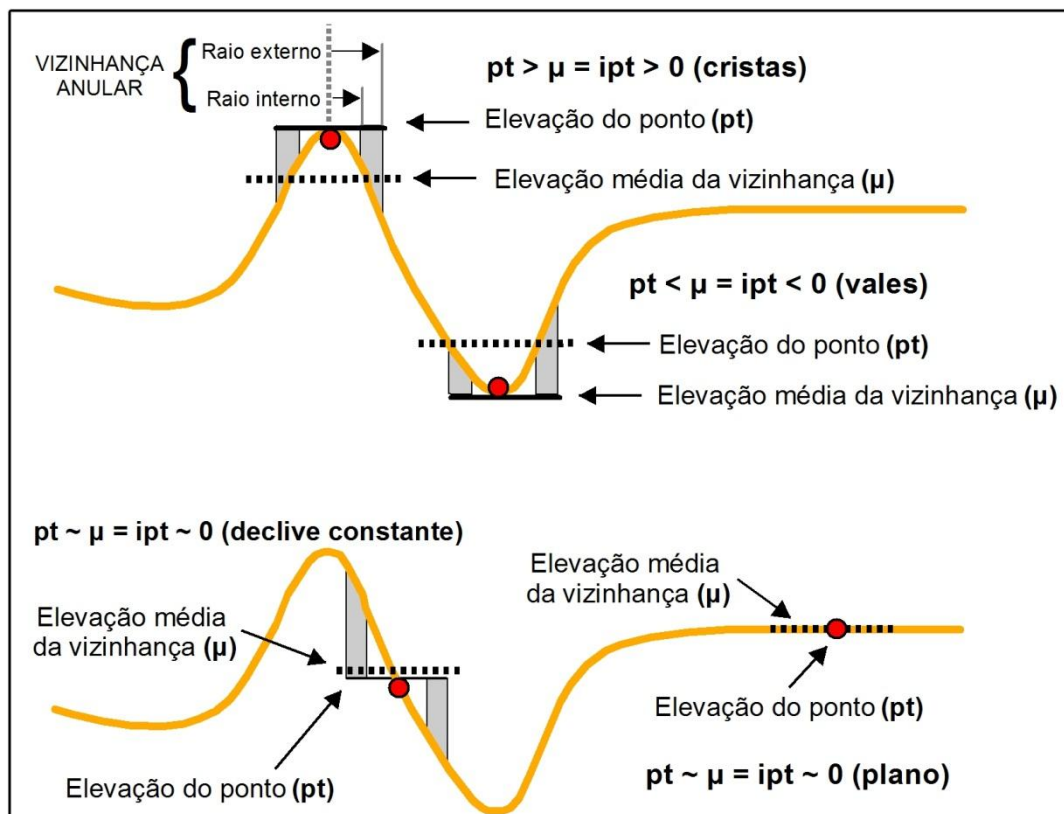


FIGURA 8 – ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA.  
Fonte: Adaptado de Weiss (2001).

TABELA 1 – IPT DISCRETIZADO EM 6 CLASSES.  
Adaptado de Weiss (2001).

Posição topográfica	Parâmetros
Cristas	> 1 desvio padrão
Vertentes superiores	> 0,5 e $\leq$ 1 desvio padrão
Vertentes intermediárias	> -0,5 e < -0,5 desvio padrão; Declividade < 5 graus
Áreas planas	$\geq$ -0,5 e $\leq$ -0,5 desvio padrão; Declividade $\geq$ 5 graus
Vertentes inferiores	$\geq$ -1 e < 0,5 desvio padrão
Vales	< -1 desvio padrão

TABELA 2 – COMBINAÇÃO DE IPTS DISCRETIZADOS EM 10 CLASSES.  
Adaptado de Weiss (2001).

<b>Formas de relevo</b>	<b>Parâmetros</b>
Vales entalhados	IPT detalhado $\leq -1$ desvio padrão e IPT generalizado $\leq -1$ desvio padrão
Vales rasos; drenagens de meia vertente	IPT detalhado $\leq -1$ desvio padrão e IPT generalizado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão
Nascentes; drenagens de alta vertente	IPT detalhado $\leq -1$ desvio padrão e IPT generalizado $\geq 1$ desvio padrão
Vales em U	IPT detalhado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão e IPT generalizado $\leq 1$ desvio padrão
Planos	IPT detalhado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão, e IPT generalizado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão e declividade $\leq 5$ graus
Vertentes intermediárias	IPT detalhado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão, e IPT generalizado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão e declividade $> 5$ graus
Vertentes superiores	IPT detalhado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão e IPT generalizado $\geq 1$ desvio padrão
Cristas locais; morros em vales	IPT detalhado $\geq 1$ desvio padrão e IPT generalizado $\leq -1$ desvio padrão
Cristas intermediárias; morros em áreas planas	IPT detalhado $\geq 1$ desvio padrão e IPT generalizado $> -1$ e $< 1$ desvio padrão
Cristas elevadas; topos	IPT detalhado $\geq 1$ desvio padrão e IPT generalizado $\geq 1$ desvio padrão

Para que a escolha do tamanho do raio não fosse definida de forma arbitrária adotou-se como referência a taxonomia hierárquica de Dikau (1990) (FIGURA 5), que atribui valores de área das feições a serem mapeadas em relação às ordens de grandeza de relevo.

Com base nesses critérios quantitativos taxonômicos, para a classificação simples (mapa de 6 classes), o raio definido para análise de vizinhança foi de 21 *pixels* (315 metros), cuja área amostral se insere na categoria de mesorelevo (área circular de aproximadamente  $10^5$  metros).

Para a classificação que considera duas matrizes do IPT (mapa de 10 classes), foram testadas três combinações: 4-34 *pixels* (60-510 metros de raio), 7-67 *pixels* (105-1005 metros de raio) e 13-113 *pixels* (195-1695 metros de raio). A

combinação intermediária (7-67) se refere aos valores mais adequados conforme taxonomia do relevo, enquanto as outras duas são a metade e o dobro desta, a fim de avaliar o efeito de detalhamento e generalização da proposta.

### 3.4.2 Método de classificação de Hammond/Dikau

A classificação manual de formas do relevo proposta por Hammond (1964), discutida, adaptada e aplicada em ambiente informatizado por Dikau *et al.* (1991; 1995) e posteriormente automatizada em ambiente SIG por Reuter (2009), consiste num sistema de classificação em três níveis hierárquicos resultante da combinação de atributos topográficos calculados a partir de uma janela móvel definida.

Para cada posição da janela, os três atributos utilizados são: a) declividade, com a porcentagem relativa de áreas definidas por um valor limítrofe de declive; b) gradiente altimétrico, que expressa a diferença entre a elevação máxima e a mínima; c) predomínio de áreas planas, com a porcentagem relativa de áreas planas ou declives suaves, conforme o valor limítrofe da declividade, que ocorrem nas porções altas e baixas do relevo, com base no valor mediano do gradiente altimétrico.

Os parâmetros são discretizados conforme QUADRO 2: a declividade em quatro classes, o gradiente altimétrico em seis e quatro classes com predomínio de áreas planas, que, combinados, resultam em até 96 formas distintas de relevo.

DECLIVIDADE		GRADIENTE ALTIMÉTRICO		PREDOMÍNIO DE ÁREAS PLANAS	
Código	Parâmetro	Código	Parâmetro	Código	Parâmetro
<b>A</b>	> 80% de áreas planas / suaves	<b>1</b>	0 - 30m	<b>a</b>	> 75% de áreas planas/suaves nas terras baixas
<b>B</b>	50 a 80% de áreas planas / suaves	<b>2</b>	30 - 91m	<b>b</b>	50 a 75% de áreas planas/suaves nas terras baixas
<b>C</b>	20 a 50% de áreas planas / suaves	<b>3</b>	91 - 152m	<b>c</b>	50 a 75% de áreas planas/suaves nas terras altas
<b>D</b>	< 20% de áreas planas / suaves	<b>4</b>	152 - 305m	<b>d</b>	< 75% de áreas planas/suaves nas terras altas
-	-	<b>5</b>	305-915m	-	-
-	-	<b>6</b>	> 915m	-	-

QUADRO 2 - PARAMETRIZAÇÃO E PARTICIONAMENTO DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS.  
Fonte: Adaptado de Dikau (1991).

As 96 subclasses que representam o maior nível de detalhamento da tríade hierárquica são reagrupados em 24 classes e estas, por sua vez, em 5 categorias

principais (QUADRO 3). Devido à baixa representatividade das atribuições qualitativas originais na área de estudo, foi realizada uma reinterpretação das classes cartografadas adequando a terminologia ante o contexto geomorfológico local.

TIPO DE FORMA DO RELEVO	CLASSE DE FORMA DO RELEVO	CÓDIGO DAS SUBCLASSES DO RELEVO
Relevo plano	Planos regulares	A1a, A1b, A1c, A1d
	Planos suaves	A2a, A2b, A2c, A2d
	Planos irregulares	B1a, B1b, B1c, B1d
	Planos irregulares com variação altimétrica	B2a, B2b, B2c, B2d
Relevo patamarizado	Patamares com baixa variação altimétrica	A3c, A3d, B3c, B3d
	Patamares com moderada variação altimétrica	A4c, A4b, B4c, B4d
	Patamares com alta variação altimétrica	A5c, A5d, B5c, B5d
	Patamares com muito alta variação altimétrica	A6c, A6d, B6c, B6d
Relevo plano com morros ou colinas	Planos com colinas	A3a, A3b, B3a, B3b
	Planos com colinas altas	A4a, A4b, B4a, B4b
	Planos com morros baixos	A5a, A5b, B5a, B5b
	Planos com morros altos	A6a, A6b, B6a, B6b
Relevo ondulado e forte ondulado	Relevo ondulado regular	C1a, C1b, C1c, C1d
	Relevo ondulado com muito baixa variação altimétrica	C2a, C2b, C2c, C2d
	Relevo ondulado com baixa variação altimétrica	C3a, C3b, C3c, C3d
	Relevo ondulado com moderada variação altimétrica	C4a, C4b, C4c, C4d
	Relevo ondulado com alta variação altimétrica	C5a, C5b, C5c, C5d
	Relevo ondulado com muito alta variação altimétrica	C6a, C6b, C6c, C6d
Relevo montanhoso e escarpado	Relevo montanhoso regular	D1a, D1b, D1c, D1d
	Relevo montanhoso com muito baixa variação altimétrica	D2a, D2b, D2c, D2d
	Relevo montanhoso com baixa variação altimétrica	D3a, D3b, D3c, D3d
	Relevo montanhoso com moderada variação altimétrica	D4a, D4b, D4c, D4d
	Relevo montanhoso com alta variação altimétrica	D5a, D5b, D5c, D5d
	Relevo montanhoso com muito alta variação altimétrica	D6a, D6b, D6c, D6d

QUADRO 3 - NÍVEIS HIERÁRQUICOS DA CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA/MORFOMÉTRICA.  
Fonte: Adaptado de Dikau (1991).

A janela adotada por Hammond (1964) foi de 9,65km x 9,65km, enquanto Dikau *et al.* (1991), a partir de um MDE com espaçamento de 200m, definiu uma janela de 9,8km x 9,8km (49x49 *pixels*). Pelo fato da área de estudo do presente trabalho ser um recorte com área total de 24,7km x 27,7km, não foi possível aplicar as janelas originais e os valores da análise de vizinhança foram adaptados.

Seguindo os mesmos critérios quantitativos taxonômicos adotados para o IPT, foram testadas três janelas amostrais (retangulares) para a aplicação do método: 7x7 *pixels* (105x105 metros), 21x21 *pixels* (315x315 metros) e 67x67 *pixels* (1005x1005 metros).

Manteve-se, também, o valor limítrofe de 8% da declividade para dividir relevos planos e suaves dos relevos ondulados e montanhosos, igualmente aos valores empregados por Hammond (1964) e Dikau *et al.* (1991).

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOLÓGICA SUPERVISIONADA

A classificação parametrizada que subsidiou a construção do mapa de unidades de relevo e formas de vertente, respectivamente, foi elaborada de modo a contemplar diversos aspectos metodológicos apresentados e aplicados neste trabalho. Trata-se, portanto, de uma síntese dos melhores resultados prévios obtidos relacionados às características geomorfológicas da área de estudo e objetivos do mapeamento final.

Nessa perspectiva, os critérios, atribuições qualitativas e parâmetros adotados para essa classificação consideram quatro tópicos principais: a) representatividade dos atributos topográficos (limiars que melhor representem as rupturas do relevo); b) representatividade das classificações resultantes do método de Hammond/Dikau e do Índice de Posição Topográfica; c) discretizações apoiadas em parâmetros estatísticos; d) discretizações apoiadas no conhecimento prévio da área de estudo e contribuições de trabalhos anteriores.

Adaptando conceitos oriundos do Sensoriamento Remoto, a classificação supervisionada consiste na identificação prévia das classes de informação a partir de áreas de treinamento que representam o comportamento médio das unidades que serão mapeadas automaticamente (NOVO, 1992). Conforme Centeno (2009), numa classificação supervisionada o usuário define as classes a partir de

amostragens (neste caso, a representatividade dos atributos topográficos e conhecimento geomorfológico prévio), a partir das quais pode calcular parâmetros estatísticos para descrever cada classe.

A classificação geomorfológica supervisionada foi realizada pela combinação dos atributos topográficos pelo processo denominado álgebra de mapas. Segundo Tomlin (1990), esta técnica é constituída por um conjunto de operações algébricas que podem ser aplicadas sobre um conjunto de mapas organizados segundo camadas de informações pertencentes a uma mesma delimitação de lugar.

### 3.5.1 Parâmetros do mapa de unidades de relevo

Para o mapa de unidades de relevo foram definidas 13 classes detalhadas derivadas da combinação de variáveis particionadas pelo processo de álgebra de mapas (TABELA 3).

TABELA 3 – PARÂMETROS DO MAPA DE FORMAS DE RELEVO.

FORMAS DE RELEVO	PARÂMETROS
Planície fluviomarinha e planícies fluviais	Hipsometria < 20m; Declividade < 6%; ITU > Média
Depósitos alúvio-coluvionares recentes reentalhados	Hipsometria > 20m; Declividade > 6%; Plano de curvatura: < -0,1
Rampas coluvionares de vertente	IPT > -1 e < 0,5 desvio padrão; Hipsometria > 20m
Rampas coluvionares em vales rebaixados	IPT < -1 desvio padrão; Hipsometria < 100m
Rampas coluvionares em vales elevados	IPT < -1 desvio padrão; Hipsometria > 100m
Calha de drenagem de planície	Acum. Fluxo > 0,1 desvio padrão; Hipsometria < 20m; Declividade < 6%
Calha de drenagem de vertente	Acum. Fluxo > 0,1 desvio padrão; Hipsometria > 20m; Declividade > 6%
Vertentes intermediárias	Hipsometria entre 20 e 400m
Vertentes elevadas	Hipsometria > 400m
Cristas e topos convexos em morros	IPT < 0,5 desvio padrão; Hipsometria < 300m; Declividade média do entorno (21x21 <i>pixels</i> ) < 40%; Unidade Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas (3º táxon)
Cristas e topos aguçados em morros	IPT < 0,5 desvio padrão; Hipsometria < 300m; Declividade média do entorno (21x21 <i>pixels</i> ) > 40%; Unidade Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas (3º táxon)
Cristas e topos convexos em serras	IPT < 1 desvio padrão; Declividade média do entorno (21x21 <i>pixels</i> ) < 40%.
Cristas e topos aguçados em montanhas	IPT < 1 desvio padrão; Declividade média do entorno (21x21 <i>pixels</i> ) > 40%.



Pelo fato do trabalho propor um avanço de escala em relação ao Mapeamento Geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKAFIORI *et al.*, 2006), para este recorte experimental o mapa de unidades de relevo foi construído de modo a contemplar feições geomórficas em nível taxonômico superior ao realizado pelo trabalho referência. Nesse sentido, as unidades geomorfológicas deste produto foram definidas tendo o 4º táxon de Ross (1992) como referência aproximada de escala geomorfológica.

O mapa possui 5 classes principais (planície, rampas coluvionares, calhas de drenagem, vertentes e cristas), subdivididas a partir de características geomorfológicas adicionais que conferem um detalhamento de feições destacadas na paisagem local.

### 3.5.2 Parâmetros do mapa de formas de vertente

A elaboração do mapa de formas de vertente contou com um número reduzido de variáveis: plano de curvatura, perfil de curvatura e declividade. Os três atributos topográficos foram discretizados em três segmentos cada (TABELA 4), que, combinados, resultaram em 27 classes distintas.

TABELA 4 – PARÂMETROS DO MAPA DE FORMAS DE VERTENTE

<b>Plano de curvatura</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Perfil de curvatura</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Declividade</b>
Segmentos convergentes	< -0,1	Segmentos convexos	< -0,1	0 a 6%
Segmentos planares	> -0,1 e < 0,1	Segmentos retilíneos	> -0,1 e < 0,1	6 a 40%
Segmentos divergentes	> 0,1	Segmentos côncavos	> 0,1	> 40%

A combinação do plano e perfil de curvatura (FIGURA 9) representam nove formas elementares (DIKAU, 1989; MACMILLAN e SHARY, 2009) definidas pelas curvaturas. Adicionalmente, acrescentou-se a declividade para indicar a inclinação destes segmentos de vertente.

A escala geomorfológica utilizada como referência para este mapa de formas de vertente está adequada ao 5º nível taxonômico proposto por Ross (1992).

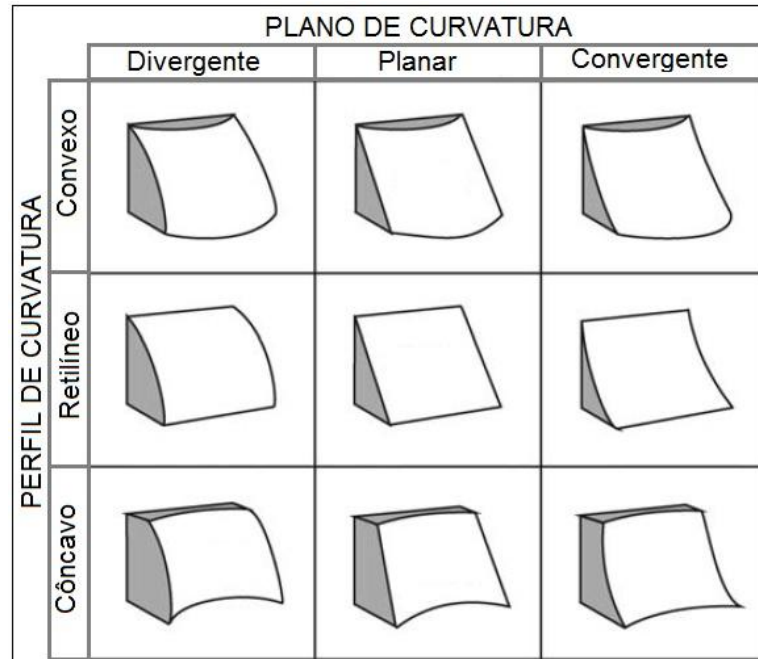


FIGURA 9 – SEGMENTOS DE VERTENTE EM PLANO E PERFIL DE CURVATURA  
 Fonte: Adaptado de Dikau (1989).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados e discussões acerca dos produtos obtidos está dividida em tópicos principais descritos a seguir: a) interpretação e análise dos atributos topográficos; b) resultados dos testes comparativos entre MDEs; c) resultados das classificações morfológicas de Hammond/Dikau e do Índice de Posição Topográfica; d) apresentação do mapa de formas de relevo e formas de vertente.

### 4.1 INTERPRETAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Os nove atributos topográficos calculados a partir do MDT de resolução horizontal 15x15 metros evidenciaram a complexidade morfométrica da área de estudo e a conseqüente variedade de unidades e padrões de relevo. A interpretação qualitativa dos resultados obtidos se pautou na comparação com a base cartográfica, com as imagens de satélite e também pelo conhecimento prévio da área de estudo, tanto da literatura quanto de trabalhos de campo preliminares.

A altimetria, representada pela FIGURA 10, revelou elevado gradiente altimétrico com elevações desde o nível do mar até os topos da Serra da Prata que beiram os 1.500 metros. As classes hipsométricas por si só ofereceram importantes contribuições para o entendimento da geomorfologia local, denotando-se as extensas áreas de planícies, com pouca mudança nos valores de elevação, os setores mais elevados da Serra do Mar, controlados pelos corpos graníticos, e os setores intermediários transicionais que circundam as montanhas. O valor altimétrico médio da área de estudo é de 304 metros.

Esses setores são detalhados pela declividade (FIGURA 11), discretizada conforme classes propostas pela EMBRAPA (2006), que evidenciou as principais rupturas do relevo. Este é o atributo topográfico mais utilizado para estudos de mapeamento ou caracterização de formas ou processos geomorfológicos, justificado pela forte correlação entre a inclinação das vertentes e a dinâmica geopedológica local.

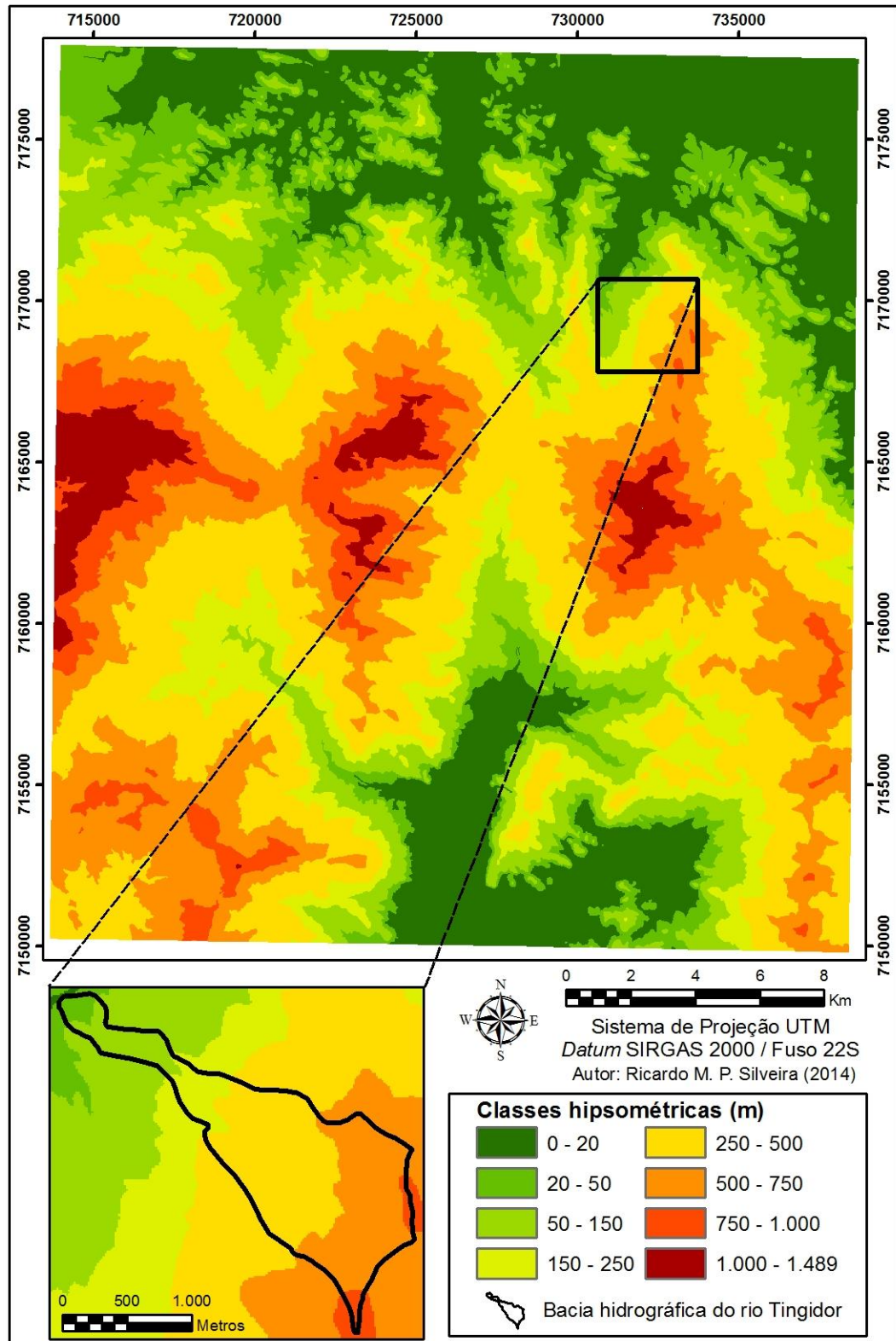


FIGURA 10 – MAPA HIPSOMÉTRICO

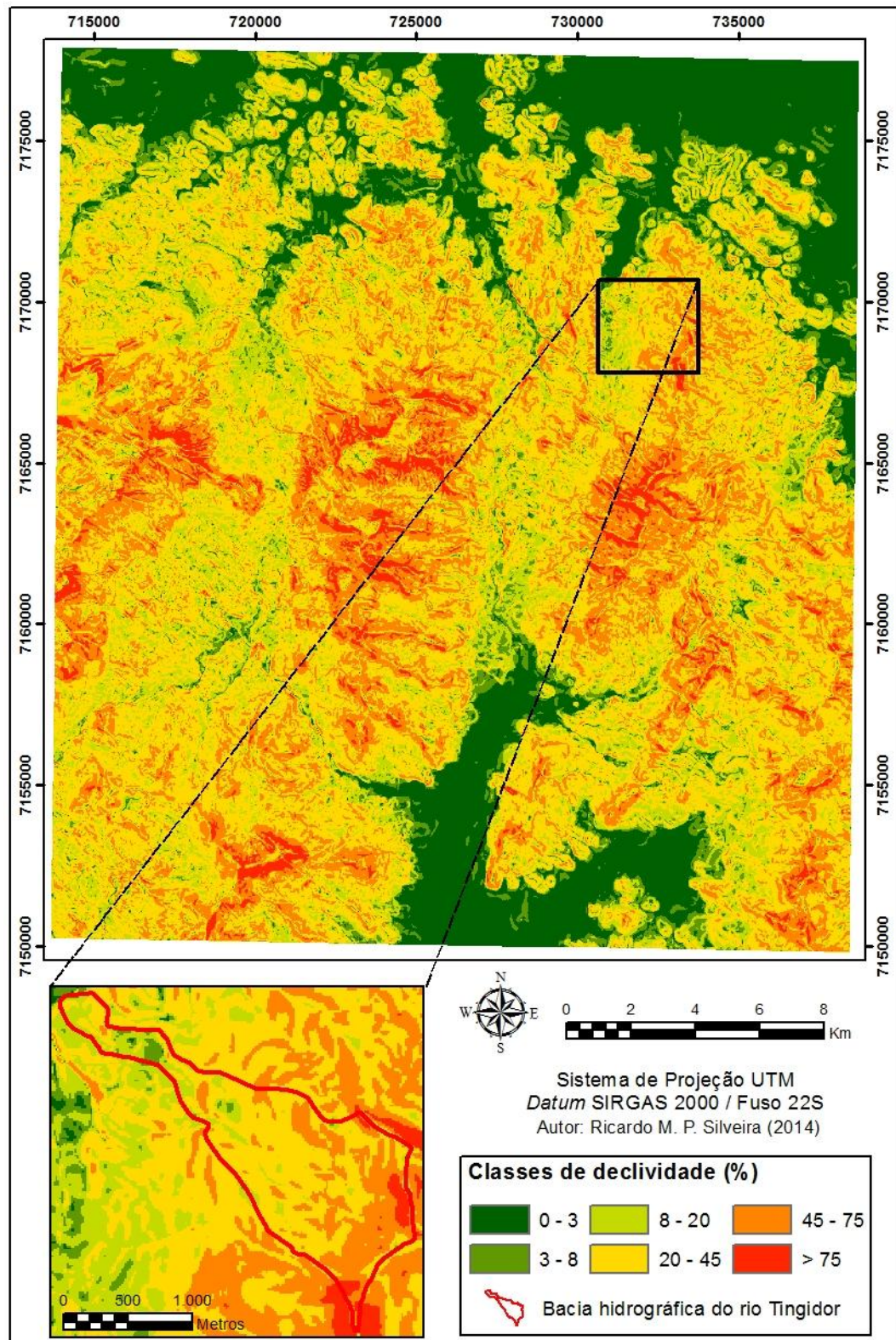


FIGURA 11 – MAPA DE DECLIVIDADE

No recorte definido como área de estudo a declividade ilustrou a heterogeneidade e rugosidade do relevo, variando de 0 a 209% e tendo como valor médio 28% de declive. Pela análise visual destaca-se a representação das áreas de

planície, com contornos mais discerníveis em relação à hipsometria, a setorização de unidades homogêneas generalizadas (como morros isolados ou as cadeias de montanhas) e também segmentos menores e rupturas localizadas em feições de detalhe. Algumas cristas também são identificadas pela interpretação dos valores de declividade, que se configuram como linhas contínuas de baixo declive cercadas por segmentos declivosos nas adjacências.

Devido aos objetivos de mapeamento do presente trabalho, o cálculo da declividade foi feito apenas para a vizinhança mais próxima (janela 3x3), considerando os oito pixels de entorno, o que resultou numa matriz com valores detalhados. Entretanto, destaca-se a potencialidade do emprego deste atributo para mapeamento de compartimentos homogêneos de maior hierarquia taxonômica considerando janelas de vizinhança maiores ou cálculos de índices de dissecação do relevo (como o índice proposto por Riley *et al.* (1999) e também Índice de Concentração da Rugosidade, proposto por Sampaio e Augustin (2014)).

A utilização dos valores de declividade para fins de mapeamento de feições é potencializada com o incremento de informações morfométricas adicionais. É o caso do índice topográfico de umidade (ITU), calculado a partir da área de contribuição (acumulação de fluxo) dividida pela tangente da declividade. Essa combinação realçou importantes características do relevo.

Conforme representado pela FIGURA 12, com classes definidas arbitrariamente por ajuste manual, o cálculo deste atributo permitiu destacar os canais de drenagem (cujo detalhamento na classificação pode indicar, ainda, o grau de entalhamento das calhas de drenagem em virtude do fluxo acumulado e da inclinação da vertente), áreas de influência alúvio-coluvionar (sob forte influência de processos gravitacionais) e a planície fluviomarinha, evidenciados pelos valores mais elevados, e também os divisores de água e setores divergentes, referenciados aos valores mais baixos obtidos. Além disso, o ITU se mostrou uma importante variável por indicar onde se concentram os processos degradacionais e também as áreas de agradação.

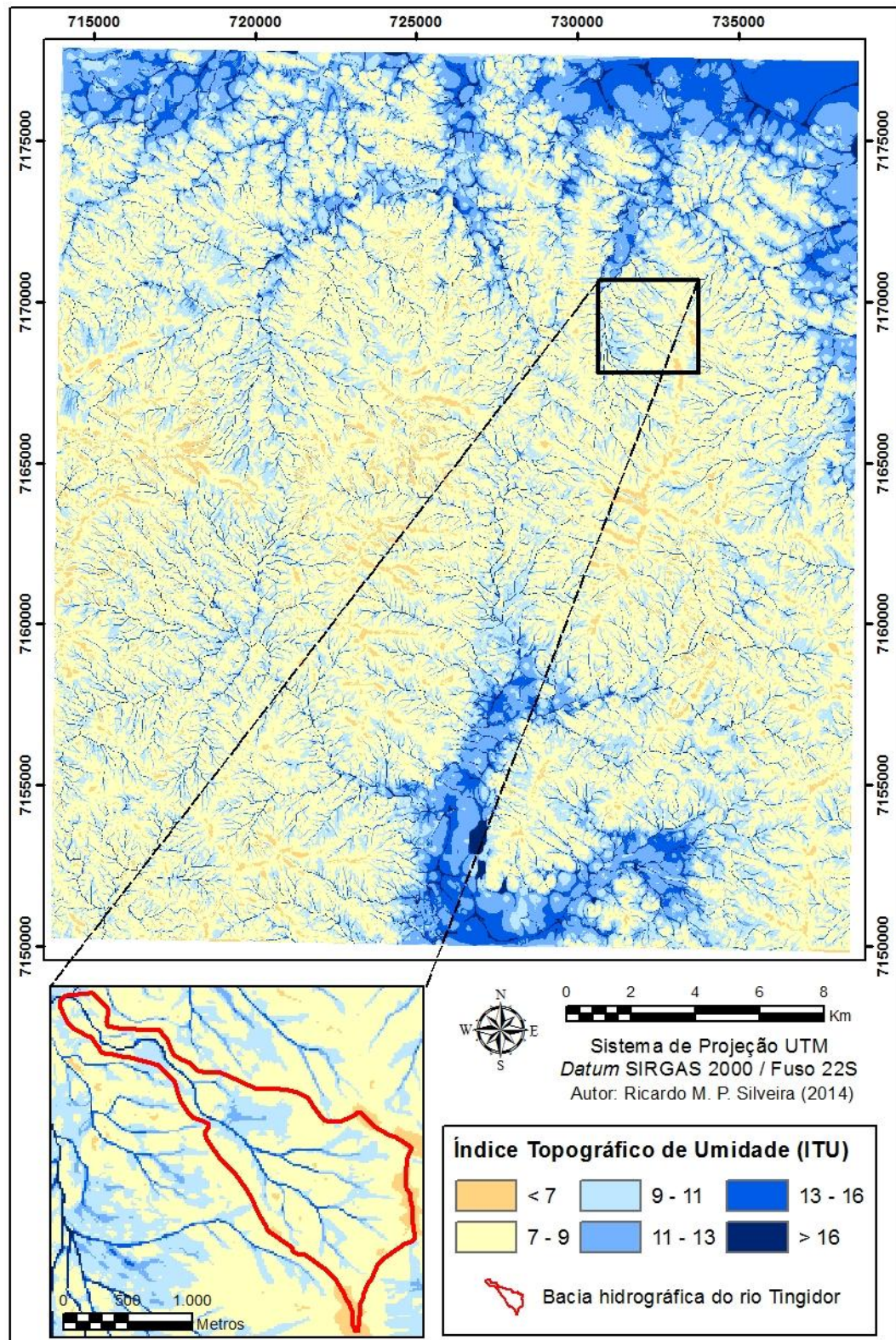


FIGURA 12 – MAPA DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE

Referente aos processos erosivos, as curvaturas se destacaram pelas mensurações de segmentos que representam processos mais recentes na escala temporal geomorfológica. Tanto o plano de curvatura (FIGURA 13) quanto o perfil de

curvatura (FIGURA 14) apresentaram valor médio de -0,03, o que indica que a área de estudo apresenta um leve predomínio de segmentos convergentes e convexos. O caráter convergente/divergente das vertentes facilitou a identificação de depósitos aluvionares de vertente, vales, depressões, áreas planas e depressões e topos locais, enquanto a convexidade/concavidade das vertentes auxiliou a compreensão dos processos gravitacionais.

Ainda associado às características de vertente, o aspecto, que representa a orientação das vertentes (FIGURA 15), foi um atributo topográfico de difícil integração com outras variáveis. Considerando a sua aplicação como informação auxiliar para mapas geomorfológicos, sua aplicação estaria condicionada aos níveis taxonômicos de mais detalhe. Se analisado em escalas maiores, entretanto, há a possibilidade de identificar os limites entre bacias hidrográficas devido à transição entre os divisores de água, como ilustrado pela bacia hidrográfica do rio Tingidor.

O sombreamento do relevo (FIGURA 16) foi o único cujos valores não serviram como referência para a classificação de feições do relevo, uma vez que é uma imagem *8-bit* derivada dos parâmetros azimutais. Este atributo é muito utilizado para mapeamentos geomorfológicos cujas delimitações de unidades são realizadas manualmente. É, portanto, um atributo de caráter mais ilustrativo do que quantitativo ou paramétrico. Ainda sim, se mostrou como importante variável auxiliar na interpretação visual das discretizações dos demais atributos topográficos e classificações morfológicas obtidas, além de ilustrar a textura do relevo.



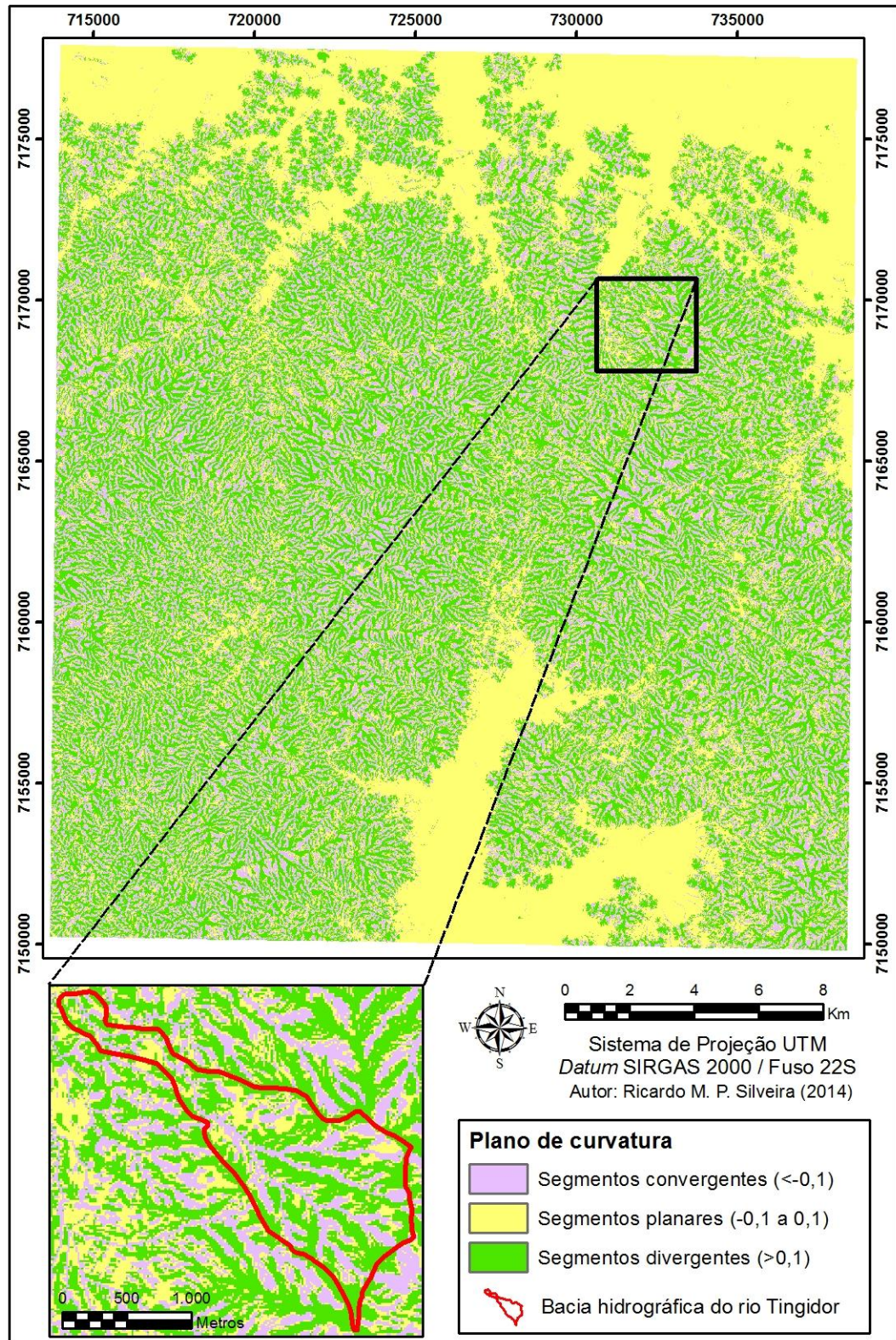


FIGURA 13 – MAPA DO PLANO DE CURVATURA

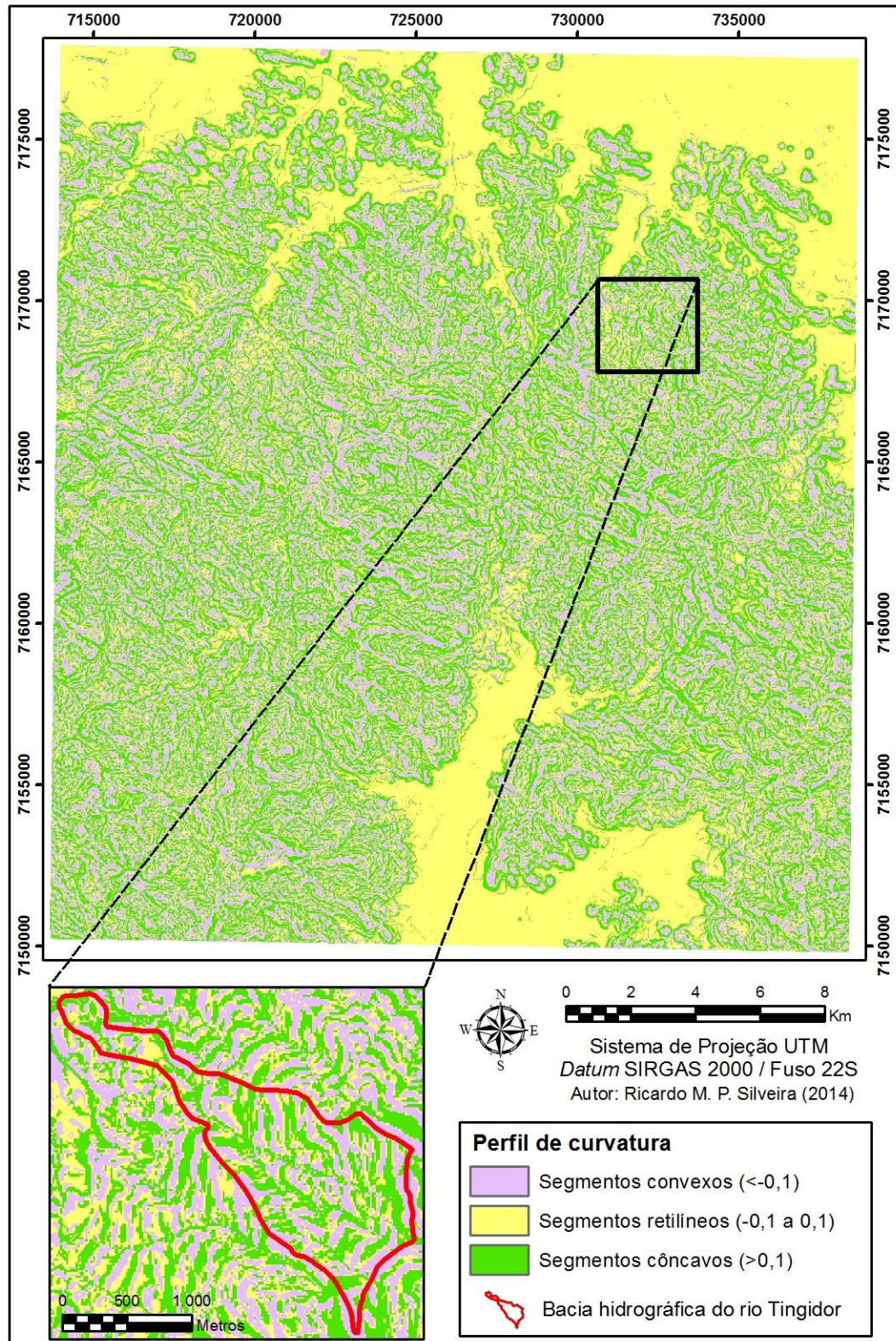


FIGURA 14 – MAPA DO PERFIL DE CURVATURA

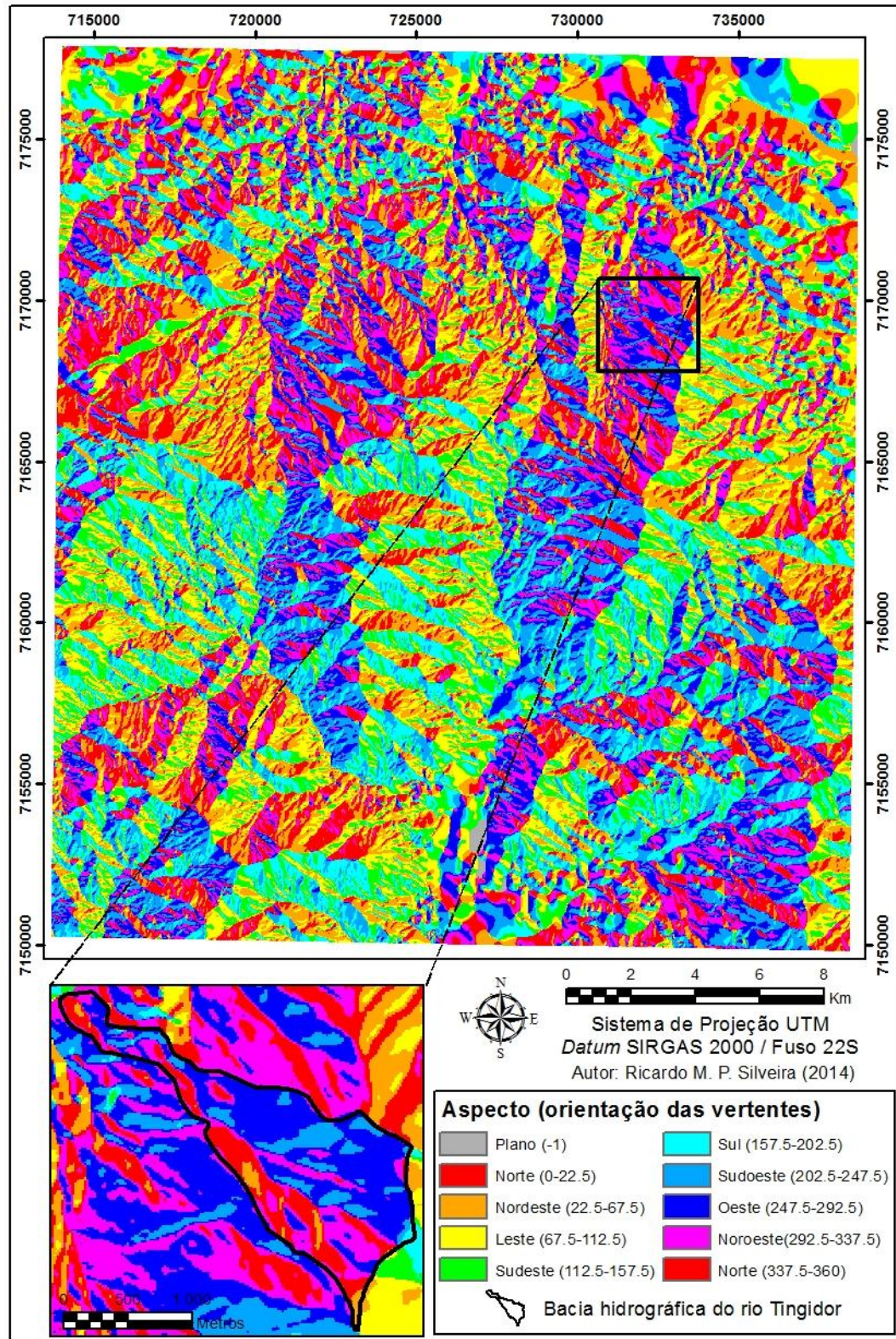


FIGURA 15 – MAPA DE ORIENTAÇÕES DAS VERTENTES (ASPECTO)

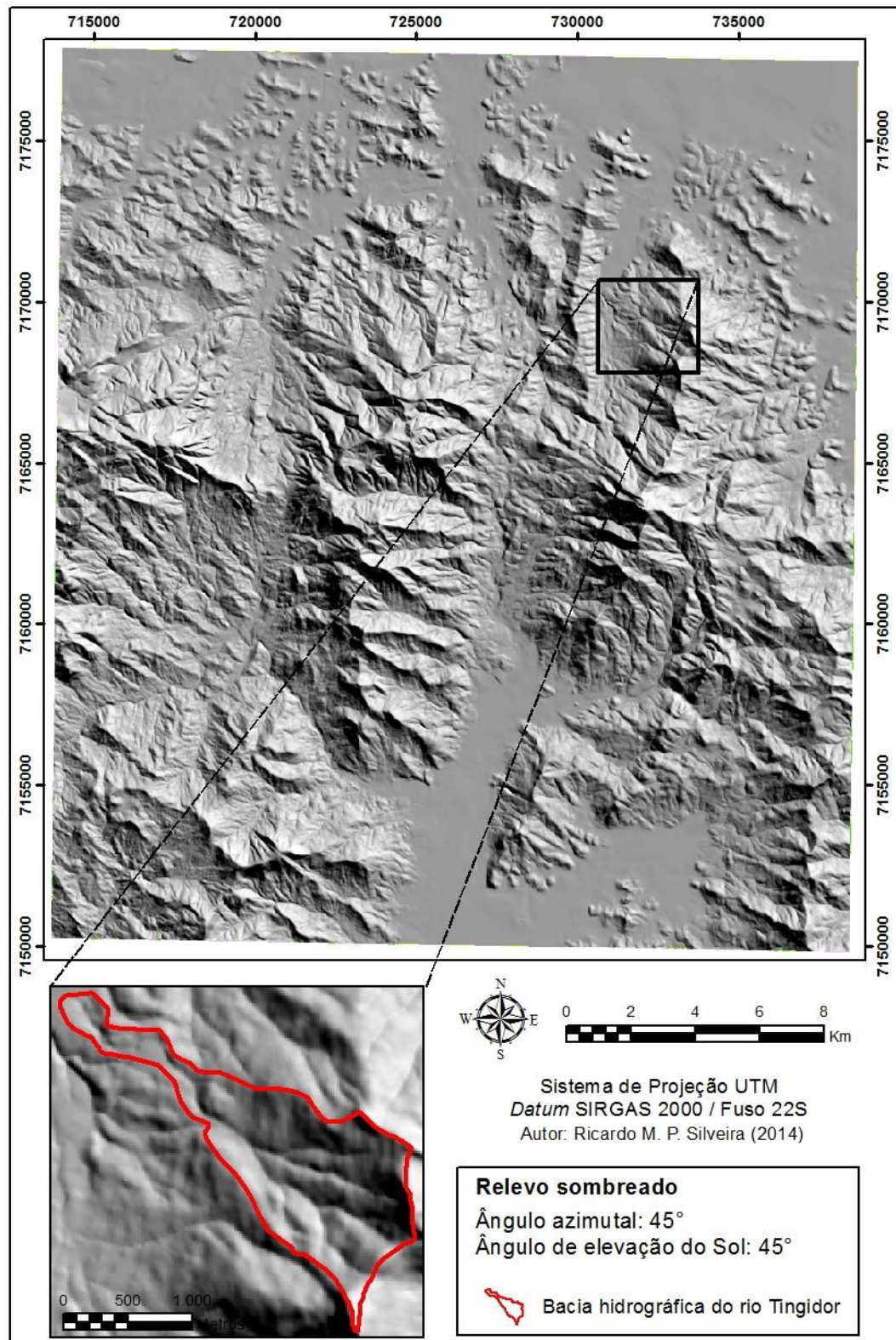


FIGURA 16 – RELEVO SOMBREADO

Salienta-se que os valores dos atributos topográficos calculados são dependentes diretos do algoritmo empregado, da resolução horizontal do MDT e

também do tamanho da janela amostral (análise de vizinhança), cujas discussões específicas serão detalhadas adiante.

## 4.2 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DO MDT

Os resultados comparativos são apresentados em duas etapas: primeiramente os resultados dos testes realizados na sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor com os MDTs *Topogrid* e, num segundo momento, os resultados dos testes entre o MDT *Topogrid* e os MDEs SRTM (banda-C versão 2, banda-C versão 4, banda X), Aster GDEM e acervo Topodata.

### 4.2.1 Avaliação comparativa entre os MDTs *Topogrid*

Os quatro MDTs gerados para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor, com o cálculo da declividade, plano de curvatura e ITU para cada um deles (FIGURA 17), demonstraram que apesar do processamento ser realizado a partir de uma única base cartográfica, pelo mesmo método de interpolação e com os valores de resolução horizontal amparados pela literatura, todos num intervalo confiável, ainda assim os resultados obtidos apresentaram significativa variação.

Visualmente se nota que o efeito de generalização/detalhamento do *pixel* é evidenciado sobretudo nos atributos topográficos, sendo mais difícil de perceber as diferenças dessa variação nos valores hipsométricos.

A comparação estatística realizada pela correlação linear (TABELA 5) reforça as considerações ilustradas. Entre as seis comparações feitas entre os MDTs e seus atributos derivados, todas entre si, em todos os casos a hipsometria apresentou correlação linear de 0,999, sendo um valor muito alto e próximo da correlação máxima.

Entretanto, esse é um resultado que, se apresentado isoladamente, omite as discrepâncias que as diferenças nos valores de elevação causam nos atributos derivados. Se num primeiro momento a variação da resolução horizontal do MDT parece não interferir significativamente nos dados morfométricos, os valores de correlação dos atributos mostra o contrário.

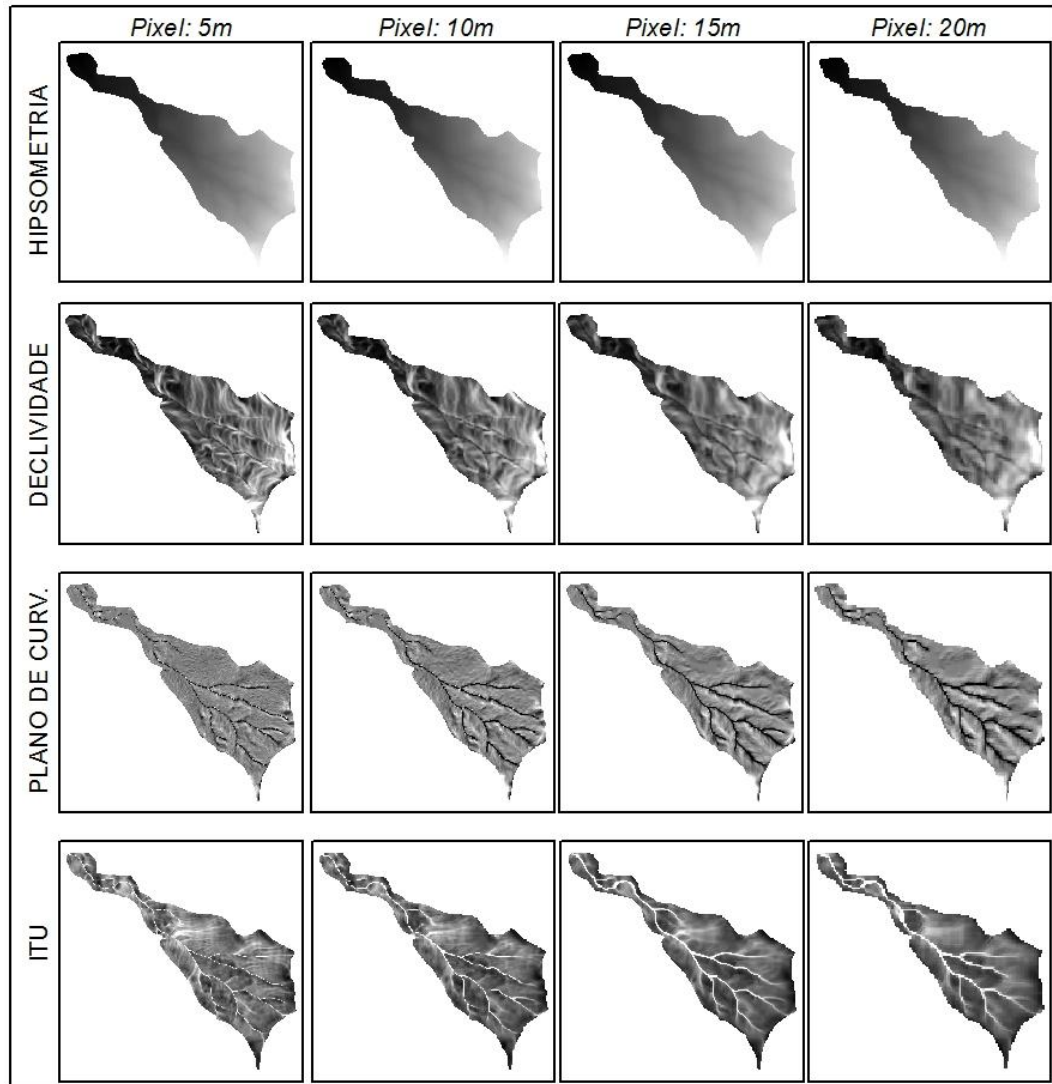


FIGURA 17 – ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS E VARIAÇÃO DA RESOLUÇÃO HORIZONTAL

TABELA 5 – CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Correlação linear		ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS			
		Hipsometria	Declividade	Plano de curvatura	Índice Topográfico de Umidade
Resolução dos MDTs correlacionados	5m - 10m	0,999	0,923	0,312	0,468
	5m - 15m	0,999	0,835	0,271	0,335
	5m - 20m	0,999	0,741	0,208	0,241
	10m - 15m	0,999	0,911	0,37	0,524
	10m - 20m	0,999	0,839	0,285	0,373
	15m - 20m	0,999	0,918	0,457	0,555

Para a declividade, os valores da correlação linear apresentaram diferenças mais evidentes em relação à hipsometria, chegando ao valor mínimo de 0,74 na comparação entre os MDTs de resolução mais distanciadas (5 e 20 metros). A melhor correlação foi de 0,92 para os MDTs de menor resolução (5 e 10 metros), destacando que mesmo para essa primeira derivada do MDT há muitas mudanças nos produtos gerados.

As principais diferenças foram denotadas pelo plano de curvatura, cuja maior correlação foi de apenas 0,45 entre a comparação da resolução de 15 e 20 metros. O menor valor obtido, de 0,2 entre o MDT de 5 e 20 metros, evidencia que este atributo topográfico é muito sensível à variação do tamanho do *pixel* e apresenta pouca representatividade de um modelo para outro. Somado a estes resultados, ao se considerar outros algoritmos, outros tamanhos da janela de vizinhança e outros MDEs obtidos por distintos métodos de extração da altimetria, os valores de correlação seriam ainda mais discrepantes.

No índice topográfico de umidade, único atributo topográfico secundário testado, a correlação variou de 0,24 (MDT 5-20m) a 0,55 (MDT 15-20m), tendo resultados sensivelmente melhores que o plano de curvatura. Entretanto, as diferenças se mostraram igualmente significativas.

Cabe destacar que o ITU mantém seu padrão espacial quando discretizado, ou seja, os divisores de água e os canais de drenagem, por exemplo, em todos os MDTs testados aparecem bem representados. Já os segmentos convergentes/divergentes, obtidos pela discretização do plano de curvatura, são classificados de modo muito distinto entre os quatro MDTs. Isso se deve ao fato de que o ITU considera a somatória do fluxo acumulado (de todo o recorte) no seu cálculo, enquanto o plano de curvatura é definido pela análise local da vizinhança mais próxima (apenas 8 células de entorno), sem fazer relação com o restante da área.

Todos os resultados obtidos pela correlação linear se deram a partir da comparação em valores contínuos, célula a célula, prevalecendo o tamanho da menor. Com a finalidade de analisar os efeitos da variação da resolução do MDT em atributos discretizados, tomando a declividade segmentada por seis classes como exemplo, a matriz de confusão permitiu quantificar o índice de exatidão global entre as classes mapeadas e os erros de um modelo para outro.

Os resultados obtidos são representados pela FIGURA 18 com todas as comparações compiladas, em síntese, e também pelas tabelas TABELA 6, TABELA 7, TABELA 8, TABELA 9, TABELA 10 e TABELA 11, contemplando as matrizes de confusão detalhadas para cada uma das comparações feitas (5-10m, 5-15m, 5-20m, 10-15m, 10-20m e 15-20m, respectivamente).

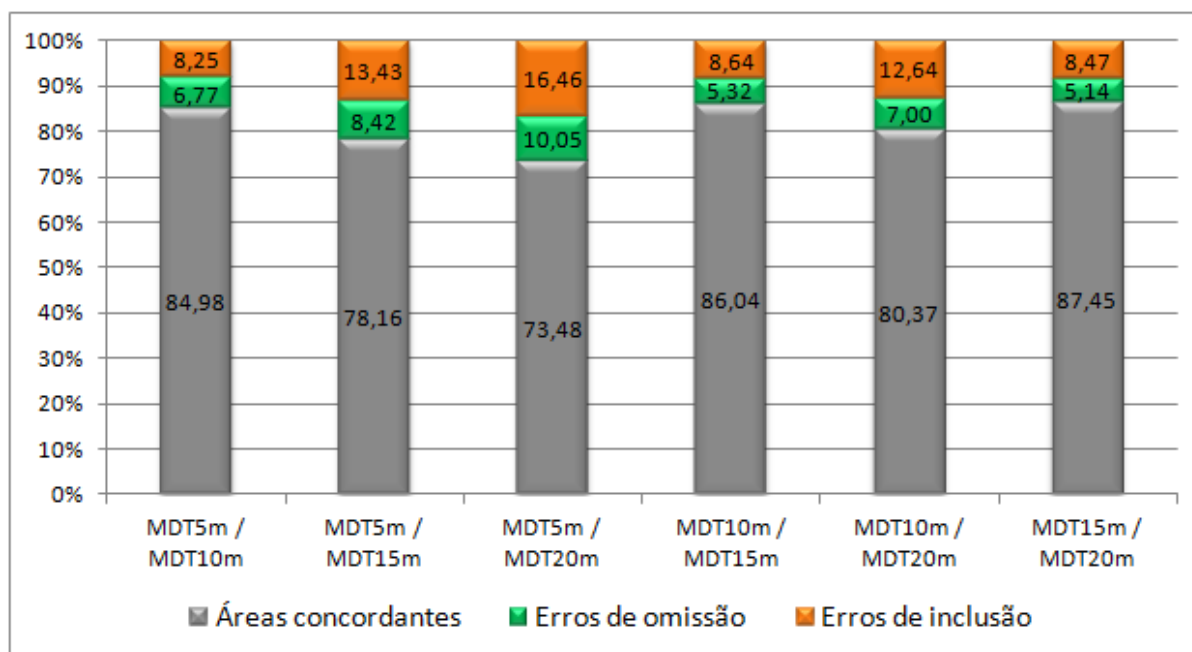


FIGURA 18 – RESULTADOS DA MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A DECLIVIDADE CALCULADA A PARTIR DE DISTINTOS MDEs

TABELA 6 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (5 X 10 METROS)

Número de pixels		Classes de declividade (MDT 10 metros)					
		0 - 3%	3-8%	8 - 20%	20 - 45%	45 - 75%	> 75%
Classes de declividade (MDT 5 metros)	0 - 3%	19	42	4	0	0	0
	3-8%	11	450	130	0	0	0
	8 - 20%	0	64	1805	375	0	0
	20 - 45%	0	0	280	8763	723	0
	45 - 75%	0	0	1	973	5131	66
	> 75%	0	0	0	1	303	655

Áreas concordantes: 84,98% Erros de omissão: 6,77% Erros de inclusão: 8,25%



TABELA 7 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (5 X 15 METROS)

Número de pixels		Classes de declividade (MDT 15 metros)					
		0 - 3%	3-8%	8 - 20%	20 - 45%	45 - 75%	> 75%
Classes de declividade (MDT 5 metros)	0 - 3%	8	20	1	0	0	0
	3-8%	4	164	85	2	0	0
	8 - 20%	4	45	697	246	1	0
	20 - 45%	0	3	187	3791	350	0
	45 - 75%	0	0	1	757	1987	36
	> 75%	0	0	0	6	175	234

Áreas concordantes: 78,16% Erros de omissão: 8,42% Erros de inclusão: 13,43%

TABELA 8 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (5 X 20 METROS)

Número de pixels		Classes de declividade (MDT 20 metros)					
		0 - 3%	3-8%	8 - 20%	20 - 45%	45 - 75%	> 75%
Classes de declividade (MDT 5 metros)	0 - 3%	5	7	7	0	0	0
	3-8%	2	76	60	4	0	0
	8 - 20%	0	13	384	167	1	0
	20 - 45%	0	0	147	2079	235	1
	45 - 75%	0	0	5	520	969	15
	> 75%	0	0	1	16	110	120

Áreas concordantes: 73,48% Erros de omissão: 10,05% Erros de inclusão: 16,46%

TABELA 9 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (10 X 15 METROS)

Número de pixels		Classes de declividade (MDT 15 metros)					
		0 - 3%	3-8%	8 - 20%	20 - 45%	45 - 75%	> 75%
Classes de declividade (MDT 10 metros)	0 - 3%	7	5	1	0	0	0
	3-8%	4	189	48	0	0	0
	8 - 20%	6	43	783	166	0	0
	20 - 45%	0	1	134	4147	230	0
	45 - 75%	0	0	0	502	2214	19
	> 75%	0	0	0	0	72	250

Áreas concordantes: 86,04% Erros de omissão: 5,32% Erros de inclusão: 8,64%

TABELA 10 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (10 X 20 METROS)

Número de pixels		Classes de declividade (MDT 20 metros)					
		0 - 3%	3-8%	8 - 20%	20 - 45%	45 - 75%	> 75%
Classes de declividade (MDT 10 metros)	0 - 3%	4	3	2	0	0	0
	3-8%	3	79	51	0	0	0
	8 - 20%	0	11	428	106		0
	20 - 45%	0	1	117	2248	173	0
	45 - 75%	0	0	1	435	1091	11
	> 75%	0	0	0	2	55	125

Áreas concordantes: 80,37% Erros de omissão: 7% Erros de inclusão: 12,64%

TABELA 11 – MATRIZ DE CONFUSÃO EM CLASSES DE DECLIVIDADE (15 X 20 METROS)

Número de pixels		Classes de declividade (MDT 20 metros)					
		0 - 3%	3-8%	8 - 20%	20 - 45%	45 - 75%	> 75%
Classes de declividade (MDT 15 metros)	0 - 3%	4	2	2	0	0	0
	3-8%	3	83	48	0	0	0
	8 - 20%	0	10	461	71	0	0
	20 - 45%	0	0	80	2475	128	0
	45 - 75%	0	0	0	247	1164	3
	> 75%	0	0	0	0	26	133

Áreas concordantes: 87,45% Erros de omissão: 5,14% Erros de inclusão: 8,47%

Pelo fato das comparações serem feitas entre modelos, sem definir qual é o mais correto ou próximo do real, os erros de inclusão e omissão (definidos pelo MDT de menor resolução) foram analisados de modo conjunto.

A exatidão global média entre as seis comparações foi de 81,7%, sendo que o menor valor foi de 73,4% (5-20m) e o maior foi de 87,4% (15-20m). O erro médio de 18,3% indica que as classificações não podem ser adotadas de modo supervisionado, dada a divergência apresentada. Em termos espaciais, a cada 10.000m<sup>2</sup> as áreas discordantes podem variar de 170m<sup>2</sup> a 670m<sup>2</sup>. Significa dizer que a cada 100 pontos de controle de campo dos mapas de declividade, de 14 a 27 pontos estariam representados por classes diferentes. Para tornar a questão mais

complexa, em campo poderia, ainda, ser constatado que o valor de declividade corresponde a uma terceira classe diferente. Assim, as incertezas se multiplicam exponencialmente: erros de modelo para modelo e de modelos para o real.

Essas considerações reforçam a importância de adequar os objetivos de mapeamento/classificação em função do MDT e parâmetros utilizados, considerando as limitações da modelagem e as margens de erros dos produtos finais. Daí a necessidade do rigor metodológico e da representação dos produtos cartográficos em escala condizente.

A FIGURA 19 ilustra as seis comparações realizadas com os valores concordantes e discordantes espacializados na sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor.

Conforme representado, a mudança de tamanho de *pixel* provoca muitas diferenças entre os mapas de declividade. Com o emprego cada vez mais frequente de MDEs para a elaboração de mapeamentos temáticos, sobretudo ligados ao planejamento (e legislação) ambiental e ordenamento territorial, os resultados obtidos demonstram que muitos cuidados devem ser tomados ao se trabalhar com classes determinísticas para fins específicos.

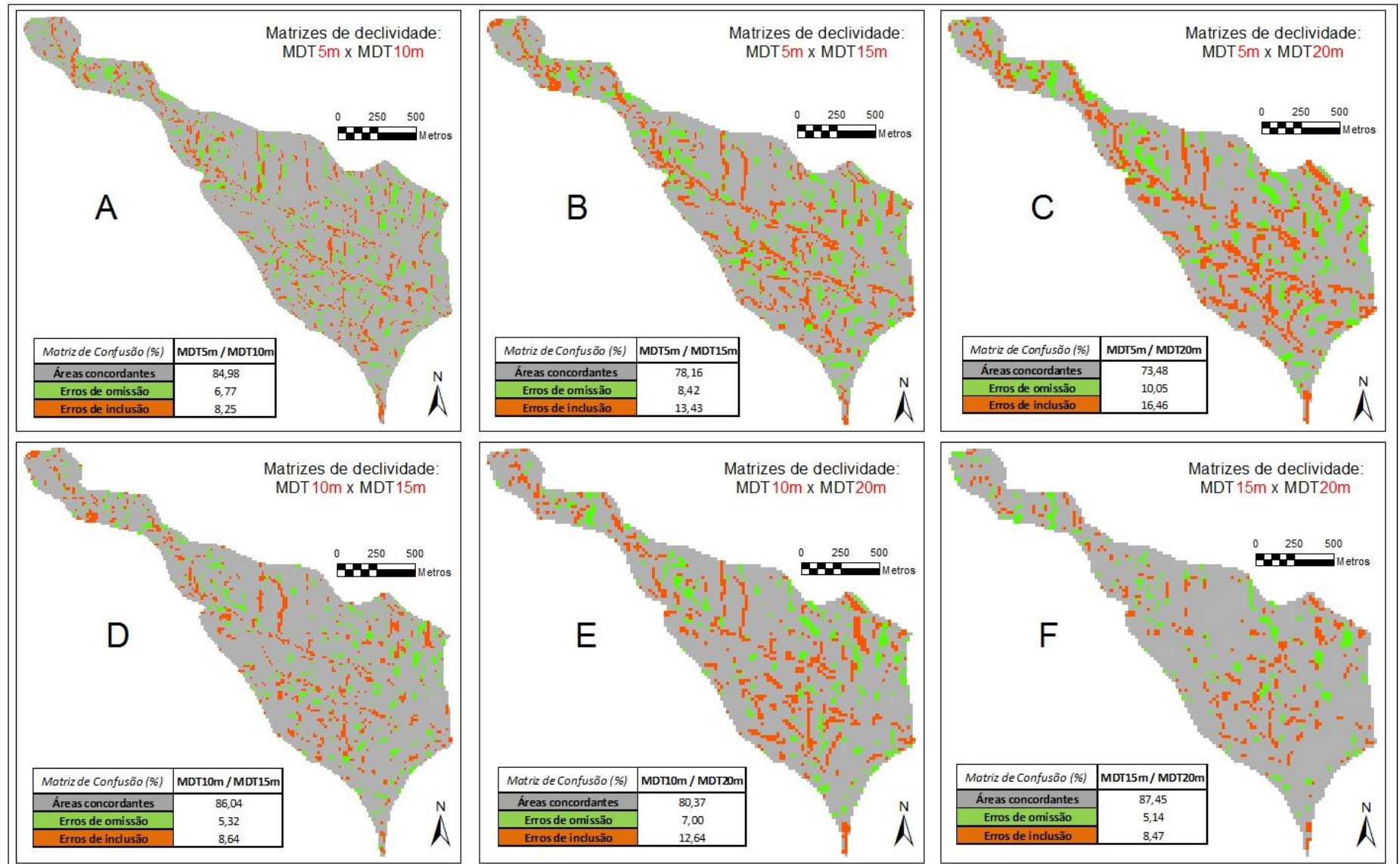


FIGURA 19 – RESULTADOS ESPACIALIZADOS DA MATRIZ DE CONFUSÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TINGIDOR

#### 4.2.2 Avaliação comparativa com MDEs globais

Além das comparações entre MDTs *Topogrid* variando a resolução horizontal, também foram efetuadas análises entre seis MDEs (*Topogrid*, *Topodata*, *Aster GDEM*, *SRTM-X*, *SRTM-C v2* e *SRTM-C v4*) obtidos por métodos distintos, de mesma resolução ou não, para todo o recorte definido da área de estudo.

O primeiro teste realizado foi o cálculo do erro médio quadrático (EMQ) a partir dos pontos cotados das cartas topográficas, que resultou em valores que variam de 0,9 metros, para o MDT *Topogrid*, até 12,64 metros, para o MDE *SRTM-C v4* (TABELA 12).

TABELA 12 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS MDES

MDE	EMQ
<i>Topogrid</i>	0,90
<i>Topodata</i>	8,77
<i>Aster GDEM</i>	10,84
<i>SRTM-X</i>	7,82
<i>SRTM-C v2</i>	11,23
<i>SRTM-C v4</i>	12,64

O EMQ abaixo de um metro para o MDT *Topogrid* se justifica pelo fato deste método considerar os pontos cotados como dado de entrada no processo de interpolação. Além disso, os outros MDEs possuem resolução maior, de 30 metros (*Topodata*, *Aster GDEM* e *SRTM-X*) e 90 (*SRTM-C v2* e *v4*), o que influi diretamente no EMQ calculado pontualmente. Assim, estes resultados não têm o intuito de estimar a acurácia dos modelos com validação de campo, mas apenas ilustrar o EMQ em relação à base cartográfica utilizada.

Uma análise mais detalhada é apresentada pela TABELA 13, com as 15 comparações possíveis entre os modelos sobrepostos, tanto para a hipsometria quanto para a declividade, e com o cálculo do erro máximo, do erro médio e do desvio padrão.

O erro máximo calculado pela diferença da elevação entre MDEs sobrepostos foi de 134 metros (*Topogrid* - *Topodata*), e o maior erro médio resultante foi de 14,4 metros (*Topogrid* – *SRTM-C v2*). O menor erro médio foi calculado na sobreposição entre o *Topodata* e *SRTM-C v2*, contabilizando 5,6 metros. Embora as resoluções

dos MDEs sejam diferentes, o Topodata foi gerado a partir da interpolação por krigagem dos valores do SRTM-C v2, o que explica esse baixo erro médio entre eles.

TABELA 13 – COMPARAÇÕES ESTATÍSTICAS ENTRE MDES SOBREPOSTOS

Comparação entre MDEs	Hipsometria (m)			Declividade (%)		
	Erro máximo	Erro médio	Desvio padrão	Erro máximo	Erro médio	Desvio padrão
<i>Topogrid / Topodata</i>	134,5	9,76	8,76	163,2	7,66	8,25
<i>Topogrid / ASTER GDEM</i>	131	9,24	9,21	163,1	9,53	9,36
<i>Topogrid / SRTM-X</i>	297,5	7,02	7,88	429,3	7,59	9,03
<i>Topogrid / SRTM-C V2</i>	187,11	14,46	13,85	135,9	9,18	10,01
<i>Topogrid / SRTM-C V4</i>	188,6	12,65	12,34	131,8	9,18	9,96
<i>Topodata / ASTER GDEM</i>	150	10,66	9,1	156,7	7,89	8,02
<i>Topodata / SRTM-X</i>	281	7,21	7,53	431,4	6,39	8,08
<i>Topodata / SRTM-C V2</i>	104,5	5,65	5,44	87,7	4,39	4,72
<i>Topodata / SRTM-C V4</i>	86	6,62	7,54	107,2	4,5	4,98
<i>ASTER GDEM / SRTM-X</i>	286	7,98	8,18	437,9	8,1	9,69
<i>ASTER GDEM / SRTM-C V2</i>	159	9,46	7,95	159,4	8,37	8,53
<i>ASTER GDEM / SRTM-C V4</i>	219	13,97	13,15	145,1	9,11	9,26
<i>SRTM-X / SRTM-C V2</i>	214	8,1	8,15	283	7,96	8,92
<i>SRTM-X / SRTM-C V4</i>	226	9,93	10,59	434,8	7,98	9,55
<i>SRTM-C V2 / SRTM-C V4</i>	152	10,94	12,19	70,8	4,16	4,97

A sobreposição das matrizes de declividade seguiu a tendência dos resultados computados para a hipsometria. Os valores de declive chegaram à diferença de 480% entre o Aster GDEM e SRTM-X num mesmo ponto, e o maior erro médio foi 9,18% entre o *Topogrid* e ambos MDEs SRTM-C. O melhor resultado comparativo novamente foi entre o Topodata e SRTM-C v2, com erro médio de 4,39% de declividade. De modo geral destaca-se que os erros médios de declive foram muito elevados.

Referente aos erros hipsométricos, além da própria resolução outros fatores podem influir nas diferenças de elevação: trajetória dos sensores, interferência de objetos na superfície (como copas de árvores) e métodos de interpolação e processamento. Algumas dessas características são evidenciadas visualmente pela FIGURA 20, que trás a representação dos MDEs sobrepostos indicando as diferenças de elevação com padrões e/ou orientações destacadas.

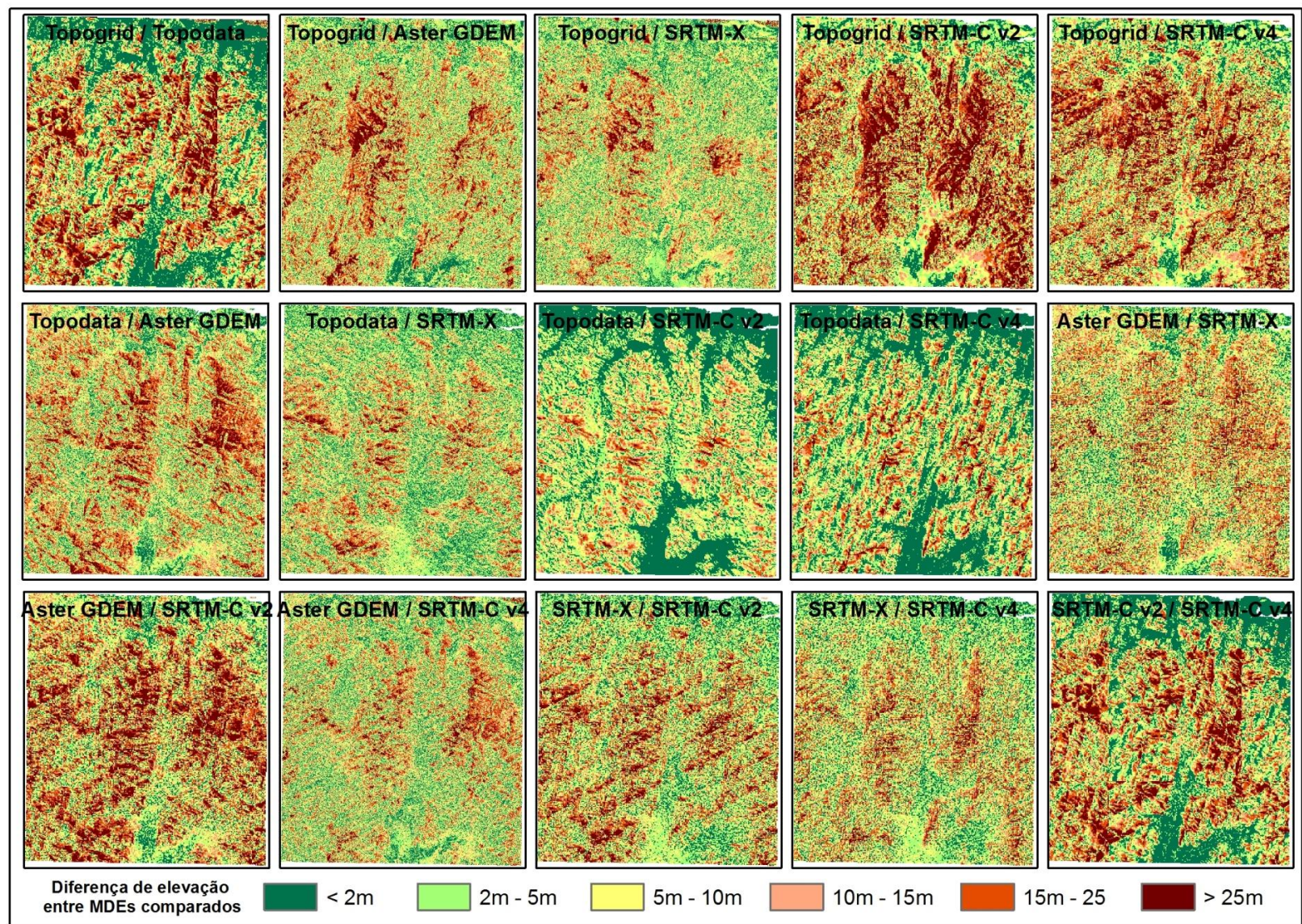


FIGURA 20 – DIFERENÇAS DE ELEVAÇÃO ENTRE MDEs SOBREPOSTOS

Associando estes resultados àqueles apresentados para a sub-bacia hidrográfica do rio Tingidor, salienta-se que todas essas comparações foram realizadas com o intuito de analisar, mesmo que de modo introdutório e superficial, alguns aspectos que constituem a complexa definição e adequação dos MDEs e, principalmente, as inúmeras variáveis inerentes que influem diretamente no produto final e nos subprodutos (atributos topográficos) derivados.

Essa análise permitiu destacar que, embora não haja como definir o modelo ideal e que todos, de um modo ou de outro, apresentam erros particulares, há possibilidades de reduzir as incertezas a partir do conhecimento prévio dos modelos, dos algoritmos empregados e dos parâmetros adotados na modelagem. Dessa forma, o reconhecimento das limitações e potencialidades se mostrou uma importante etapa que favorece a utilização dos MDEs para aplicações específicas e auxilia as discussões posteriores sobre os produtos obtidos.

Outro ponto importante discutido na literatura e corroborado pelas análises efetuadas entre os modelos: quanto maior a resolução do *pixel*, mais os atributos topográficos tendem ao valor médio, resultando em matrizes com valores suavizados. Conseqüentemente, o detalhamento da resolução resulta em valores mais extremos.

## 4.3 CLASSIFICAÇÕES PREEXISTENTES DE FORMAS DE RELEVO

### 4.3.1 Índice de Posição Topográfica

A classificação dos valores do índice de posição topográfica proposta por Weiss (2001) resultou em quatro mapas morfológicos: o primeiro de 6 classes, com raio de análise de vizinhança de 21 *pixels*, indicando as posições de vertente (FIGURA 21), e os outros três de 10 classes, com três combinações de raios para a identificação de formas de relevo: 4-34 *pixels* (FIGURA 22), 7-67 *pixels* (FIGURA 23) e 13-113 *pixels* (FIGURA 24). Em todas as classificações mantiveram-se as nomenclaturas originais da proposta, traduzidas, a fim de avaliar a representatividade das mesmas na área de estudo.



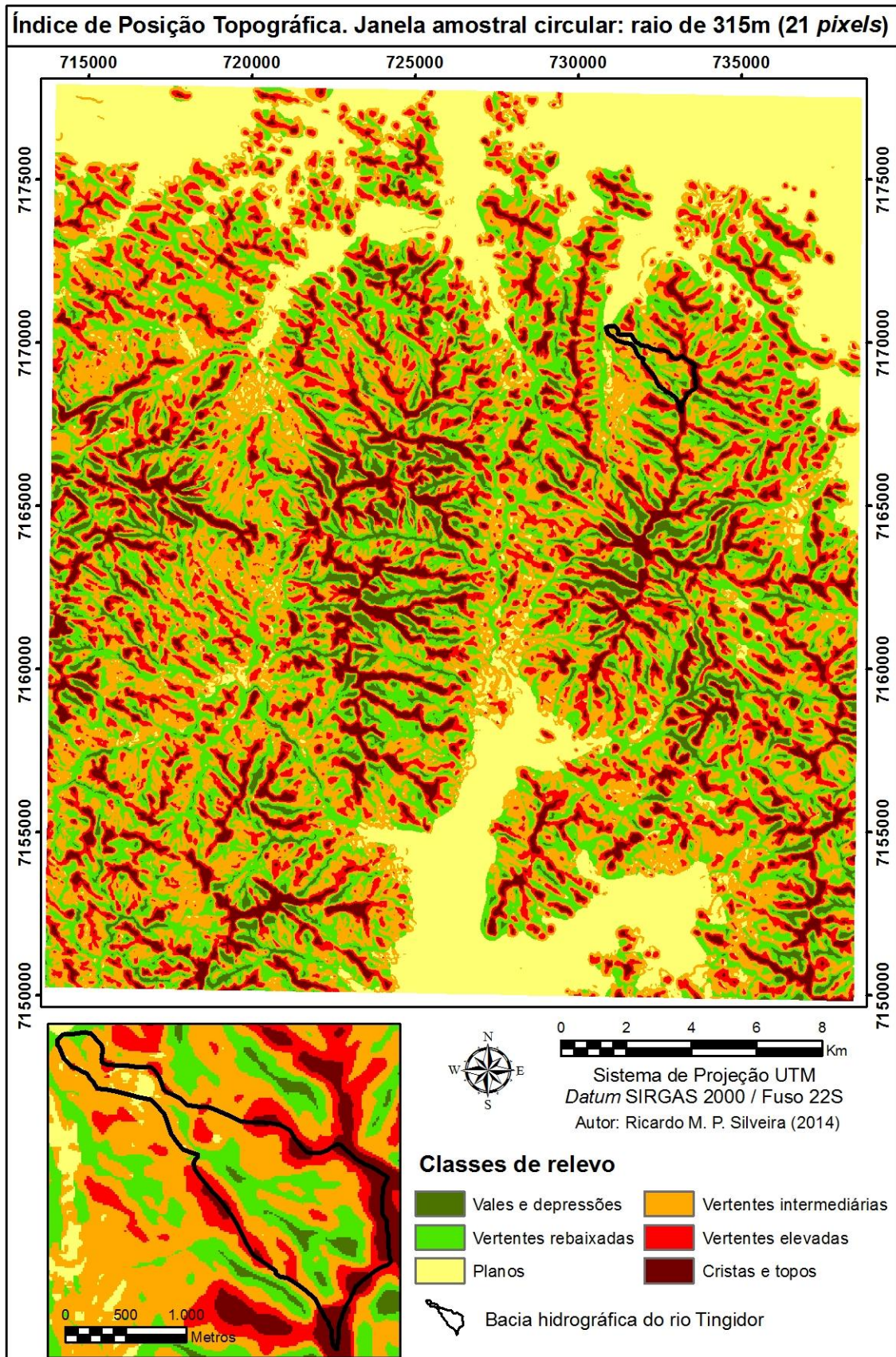


FIGURA 21 – MAPA DE 6 CLASSES DO IPT (RAIO DE 21 PIXELS)

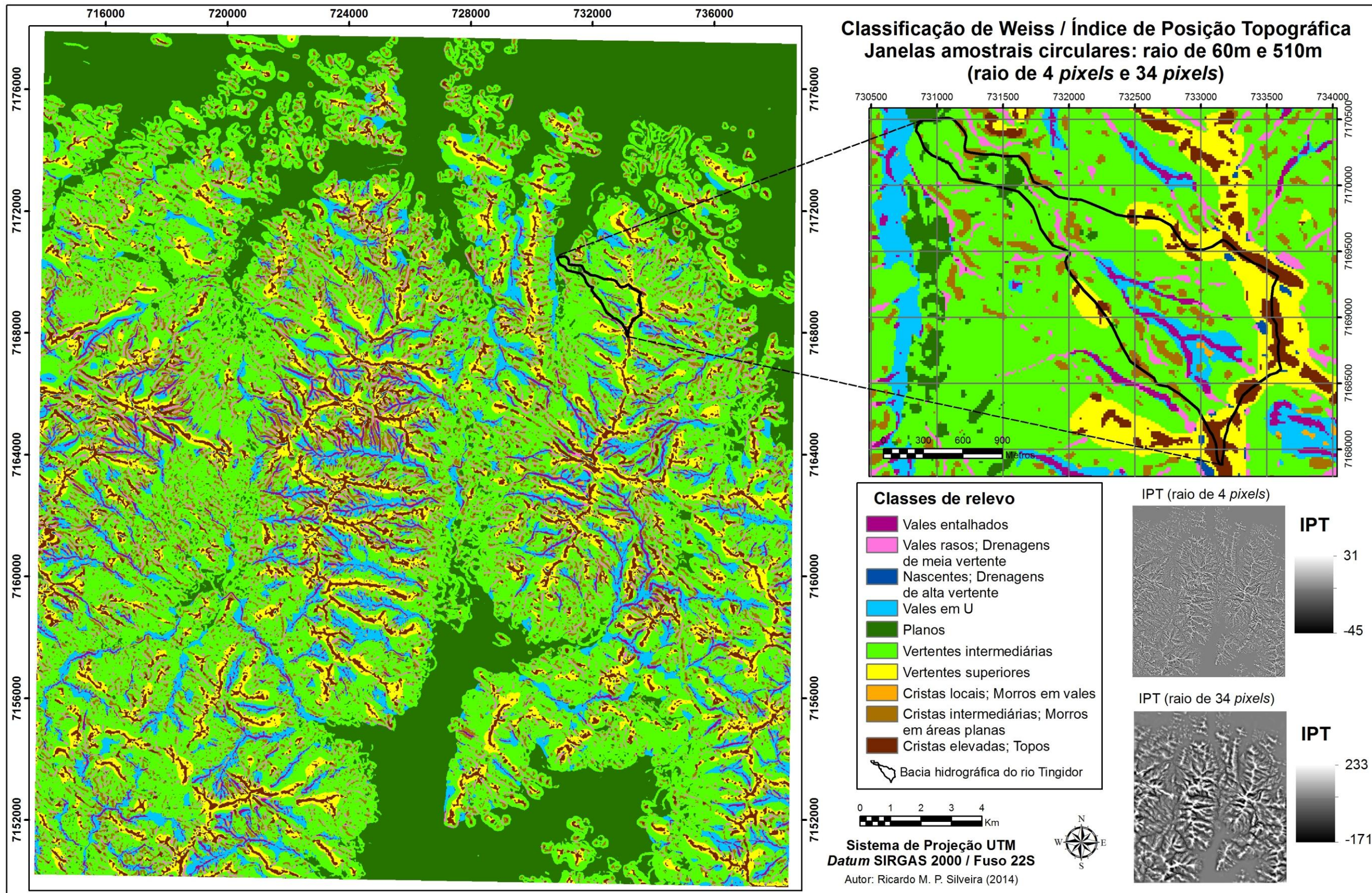


FIGURA 22 – MAPA DE 10 CLASSES DO IPT (RAIO DE 4 E 34 PIXELS)

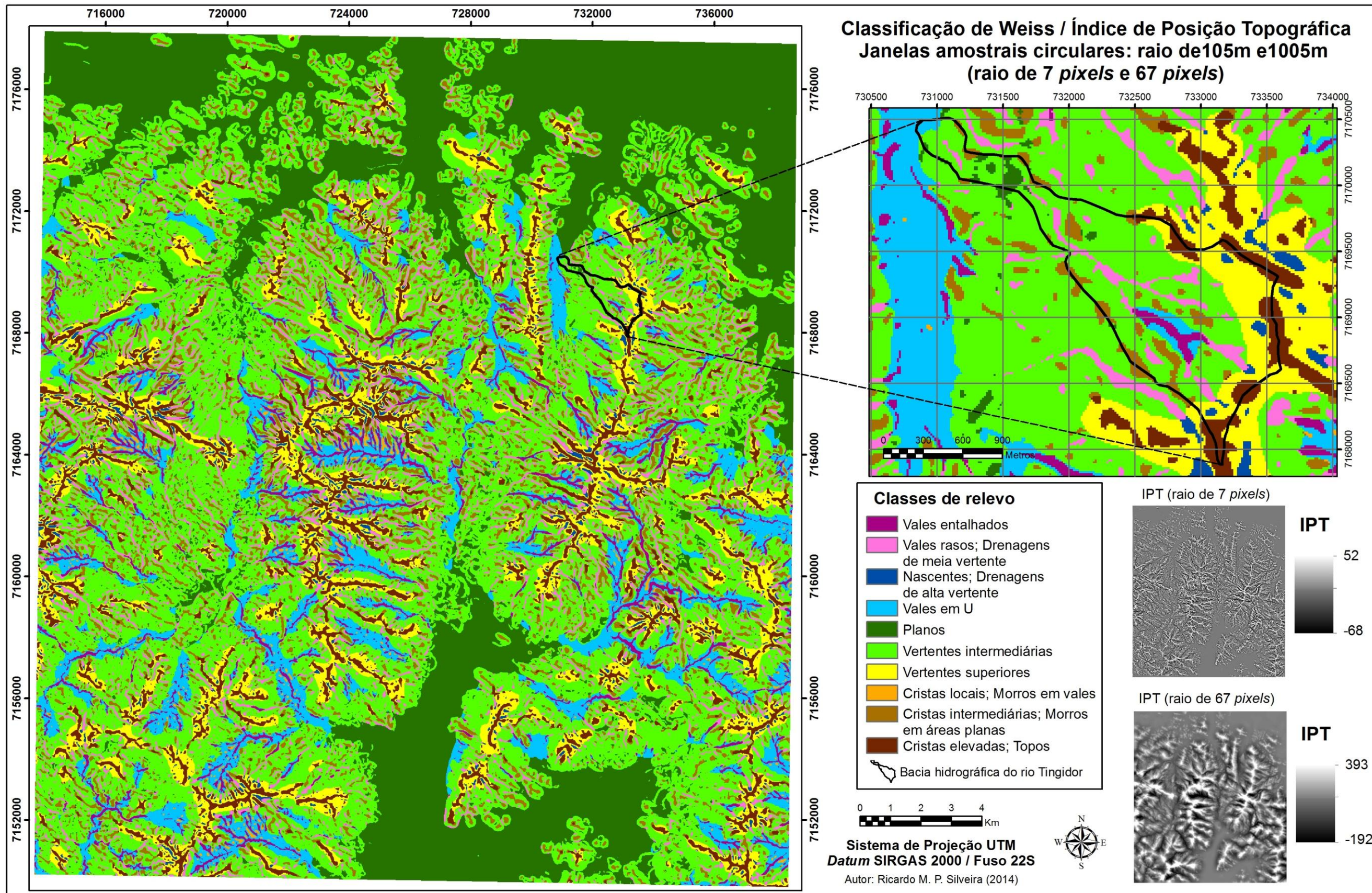


FIGURA 23 – MAPA DE 10 CLASSES DO IPT (RAIO DE 7 E 67 PIXELS)

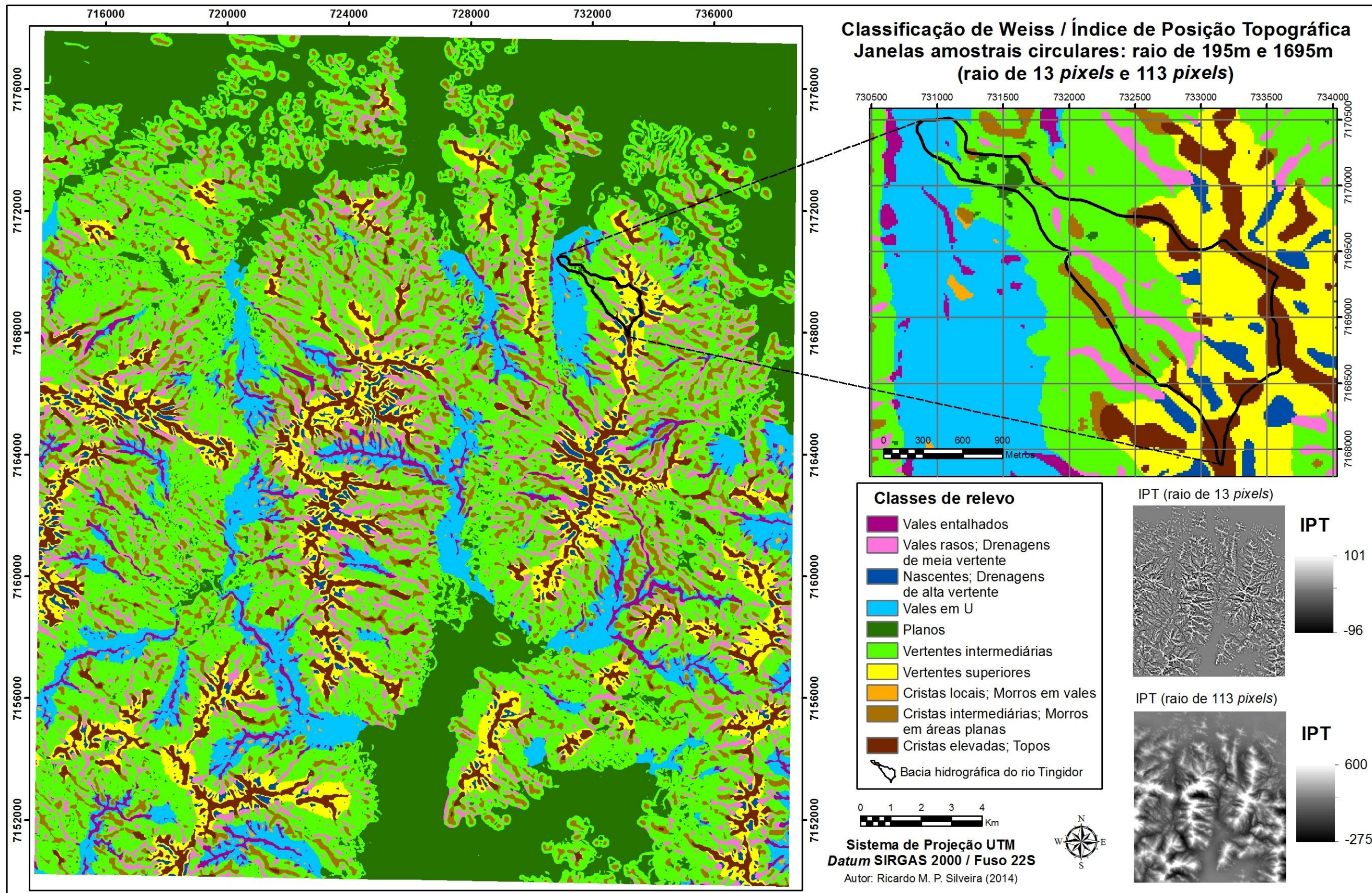


FIGURA 24 – MAPA DE 10 CLASSES DO IPT (RAIO DE 13 E 113 PIXELS)

A classificação de 6 classes, que considera a discretização de um único IPT, mapeou importantes segmentos de relevo com base em sua posição na vertente. As áreas planas ficaram bem caracterizadas, de forma contínua e sem ruídos, assim como as cristas e topos, que evidenciaram as principais elevações (gerais ou locais) do recorte. Muitos vales e depressões, sendo as áreas mais rebaixadas em relação ao seu entorno, também foram mapeados corretamente, ainda que os limites de quebra necessitem de ajustes. A classe das vertentes intermediárias, que representam declives predominantemente constantes, destacou os terços médios da Serra do Mar, enquanto a classe das vertentes rebaixadas representou alguns vales de menor nível de entalhamento ou bases de montanhas e morros isolados. Já a classe nomeada vertentes elevadas apresentou muitos erros espúrios localizados em setores intermediários e limites imprecisos nos topos da Serra do Mar. Entretanto, desta classe destaca-se a representação dos morros isolados, a norte da área de estudo.

Parte desses problemas de representatividade das classes, principalmente em função do ajuste dos valores de quebra, foram solucionados pelas classificações que contemplam 10 classes a partir da combinação de duas matrizes de IPT com janelas amostrais diferentes, uma detalhada e outra generalizada. Por outro lado, nestas classificações também foi constatado o aumento considerável de erros espúrios, ou seja, um pequeno agrupamento de *pixels* de mesma classe que não condiz com a(s) classe(s) predominante(s) circundante(s).

Dentre as três classificações testadas, a que apresentou descontinuidades mais significativas foi a que considerou os menores valores da janela amostral (4 e 34 *pixels*, ou 60 e 510 metros), conforme a FIGURA 22. Com exceção das classes “Planos”, “Vertentes superiores”, “Vales em U” e “Vertentes intermediárias”, todas as demais seis classes, em maior ou menor quantidade, apresentaram muitos ruídos. A classe que melhor representa esses erros é a denominada “Vales rasos; Drenagens de meia vertente”, que se propõe a mapear segmentos contínuos de acumulação de fluxo, mas no mapa apenas indicou linhas fragmentadas.

Por outro lado, se a utilização de pequenas janelas amostrais produziu muitos erros residuais, a generalização do raio resultou em algumas classes desproporcionais com exagero de área, como ilustra a FIGURA 24. Para a maioria das classes a generalização provocou bons resultados: continuidade de cristas e topos elevados, representação dos vales e aumento dos limites da classe “vertentes

superiores”, que representa o terço superior da Serra do Mar. Por outro lado, a classe “Vales em U”, foi mapeada de modo exagerado, ocupando áreas pertencentes a outras unidades morfológicas (seja na planície ou no setor intermediário das vertentes da Serra do Mar).

A classificação que representa o meio termo entre essas duas primeiras apresentadas, com raio de 7 *pixels* (105m) para o IPT menor e 67 *pixels* (1005m) para o IPT maior — sendo considerada a que apresenta os valores adequados de raio para essa escala e para os objetivos de mapeamento —, manteve muitos erros de pequenos agrupamentos de classes, entretanto os limites ficaram mais fidedignos à morfologia local (FIGURA 23).

Os resultados obtidos pelas três classificações, considerando o dobro e a metade da janela amostral, reforçam três considerações principais: a) os bons resultados da discretização do IPT pelos valores de desvio padrão, que possibilita a aplicação da classificação em diferentes recortes com características geomorfométricas igualmente distintas; b) embora o método seja dependente do fator de escala, mesmo com grande variação das janelas amostrais as classificações apresentaram similaridades. O tamanho do raio, portanto, apresentou maior influência nos limites e contornos do que na definição em si das classes morfológicas; c) de modo geral, as atribuições qualitativas (traduzidas da proposta original) se mostraram representativas e condizentes, embora algumas nomenclaturas (como as classes dos “vales”) possam receber denominações adicionais.

Um dos principais problemas do IPT é a definição da janela amostral e as variações causadas por esses valores. O IPT é, portanto, dependente do fator de escala. Como exemplo, a figura 29 evidencia três escalas de abordagem para a definição do raio de análise. Em cada caso, o ponto de referência está localizado no topo de uma pequena colina situada no interior de um vale maior. No primeiro caso (FIGURA 25A), o tamanho do raio de análise é pequeno o suficiente para que o ponto tenha a mesma elevação em toda a região analisada, de modo que o IPT seja aproximadamente zero. No segundo caso (FIGURA 25B), a janela amostral é grande o suficiente para contemplar toda a colina, e o ponto, conseqüentemente, apresenta maior elevação que seus vizinhos, resultando em valores positivos do IPT. Na última situação (FIGURA 25C), a vizinhança inclui as colinas de ambos os lados do vale e,

portanto, o ponto se encontra mais rebaixado que a elevação média do seu entorno e os valores do IPT são negativos.

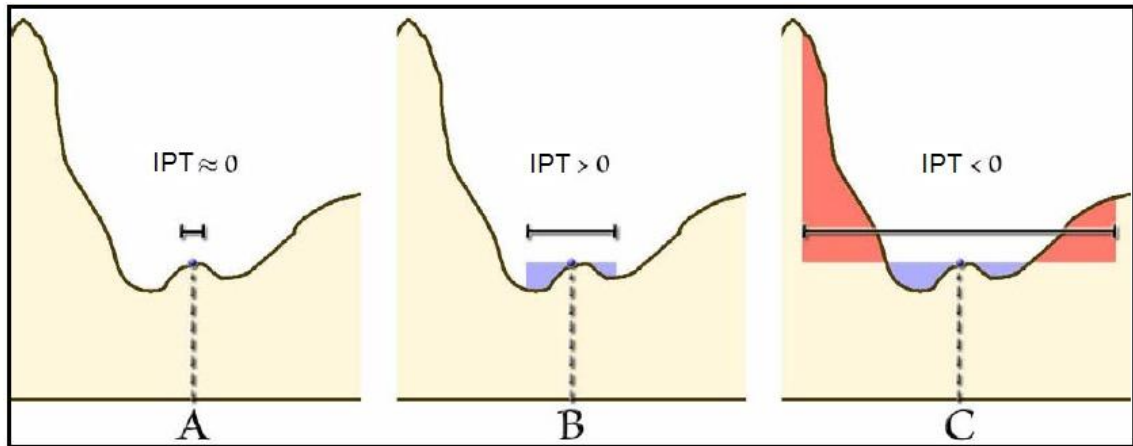


FIGURA 25 – INFLUÊNCIA DO FATOR DE ESCALA NOS RESULTADOS DO IPT.  
Fonte: Adaptado de Jenness (2006).

#### 4.3.2 Classificação de Hammond/Dikau

As nove classificações obtidas, com três tamanhos de janelas amostrais para os três níveis hierárquicos, demonstraram que a determinação das janelas afeta diretamente o produto final.

De modo geral, destaca-se que as classificações obtidas distinguiram áreas homogêneas e evidenciaram diferenças do terreno de acordo com os parâmetros preestabelecidos. Esses resultados não configuram um mapa geomorfológico, mas sim uma classificação amparada em intervalos morfométricos que, preliminarmente, oferece subsídios para a compreensão do relevo sob a perspectiva morfológica.

Conforme representado, quanto menor o tamanho da janela móvel utilizada para o cálculo de predomínio das variáveis geomorfométricas, maior é o nível de detalhamento da classificação. Da mesma forma que para o índice de posição topográfica, a opção pela escolha da área amostral, portanto, está diretamente relacionada ao fator de escala pretendido para a representação do produto final e também às feições de interesse a serem mapeadas.

Para o primeiro nível hierárquico, com cinco classes possíveis, a classificação de janela amostral  $7 \times 7$  pixels (105x105m), representada pela FIGURA 26, mapeou três tipos de relevo: relevo plano, relevo montanhoso e escarpado e relevo ondulado

e forte ondulado. Devido à pequena área de análise para cálculo da predominância das variáveis morfométricas, esta última classe não se mostrou representativa, indicando apenas o contato linear entre as porções montanhosas e a planície.

Na classificação de tipos de relevo com janela amostral 21x21 *pixels* (315x315m), conforme FIGURA 27, o cenário mapeado é o mesmo, mas com a expansão da classe relevo ondulado e forte ondulado. Com a janela amostral generalizada (67x67 *pixels* ou 1005x1005m), conforme FIGURA 28, surge uma nova classe mapeada: relevo plano com morros ou colinas.

Esses resultados apontam que em áreas de transição abrupta de elevação ou de declividade não são mapeadas unidades homogêneas, mas sim níveis de dissecação que não têm correlação direta com as designações das classes. O ponto forte dessa classificação de tipos de relevo, todavia, foi o mapeamento dos dois principais compartimentos da área de estudo: a planície e as áreas serranas.

O QUADRO 4 apresenta uma comparação entre as propostas de classificação de Hammond (1964), Dikau (1991) e as adaptações realizadas no presente trabalho, evidenciando, em síntese, as principais características de cada uma delas.

	<b>Hammond (1964)</b>	<b>Dikau et al. (1991; 1995)</b>	<b>Proposta atual</b>
<b>Localização / Área</b>	Estados Unidos da América / 9.826.675 km <sup>2</sup>	Estado do Novo México (EUA) / 314.255 km <sup>2</sup>	Recorte da Serra do Mar (Paraná, Brasil) / 686 km <sup>2</sup>
<b>Fonte de dados</b>	Cartas topográficas, escala 1:250.000 ( <i>Army Map Service</i> , EUA)	MDT derivado de cartas topográficas na escala 1:250.000 (USGS, originalmente DMA, EUA).	MDT derivado de cartas topográficas na escala 1:25.000 (DSG, 2002).
<b>Resolução do dado</b>	Intervalo do contorno: 15.2-61m	200m	15m
<b>Tamanho da área amostral (janela)</b>	9,65km x 9,65km	9,8km x 9,8km	105m x 105m 315m x 315m 1005m x 1005m
<b>Deslocamento da área amostral</b>	9,65km	200m	15m
<b>Densidade amostral (número de janelas / 400km<sup>2</sup> de área)</b>	4,3	10.000	1,77 milhões
<b>Escala do mapa final</b>	1:5.000.000	1:1.000.000 (variável)	1:25.000 (variável)

QUADRO 4 – PARÂMETROS EMPREGADOS NAS PROPOSTAS ORIGINAIS E NA ATUAL



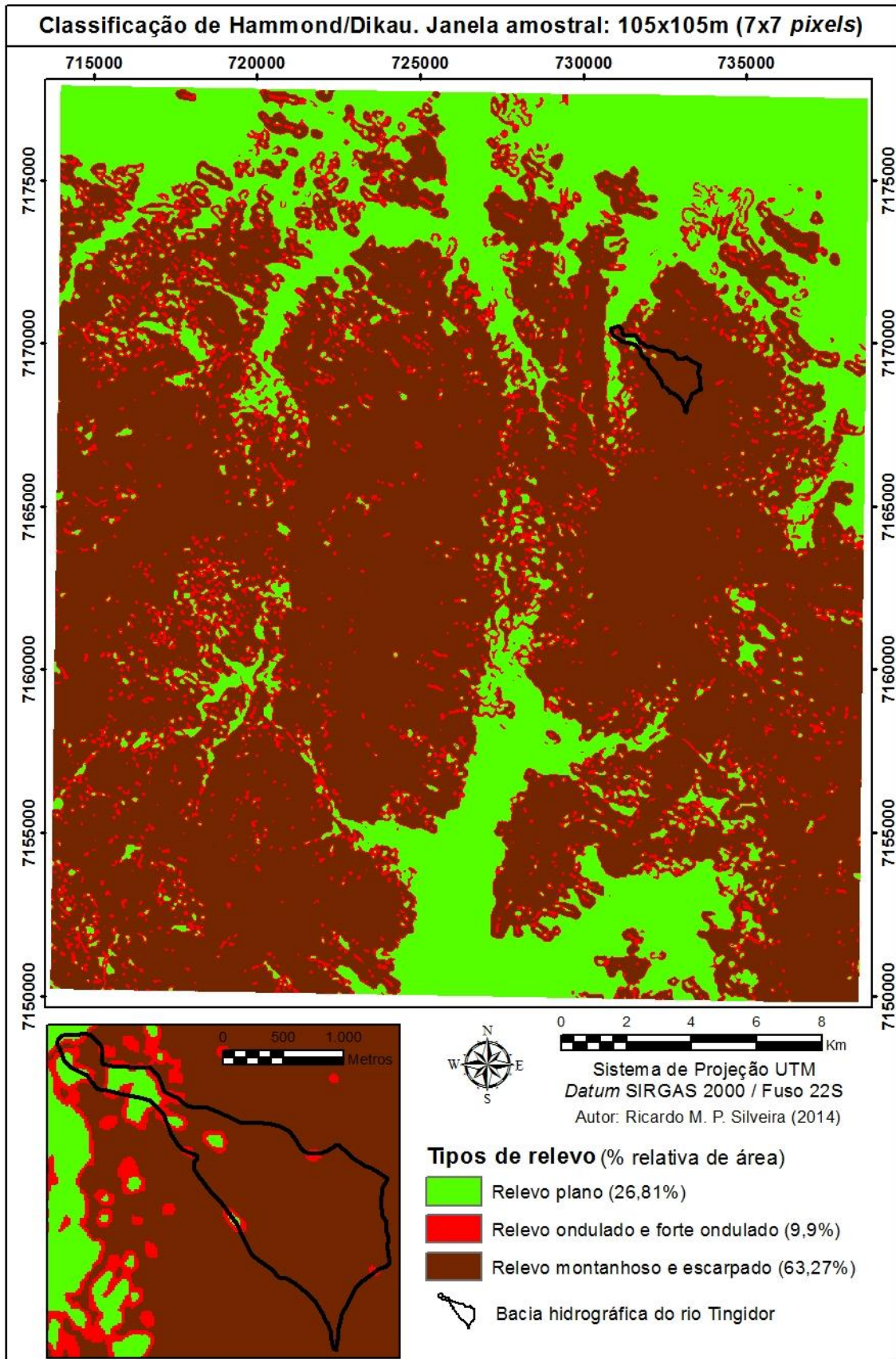


FIGURA 26 – MAPA DE TIPOS DE RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 7X7 PIXELS)

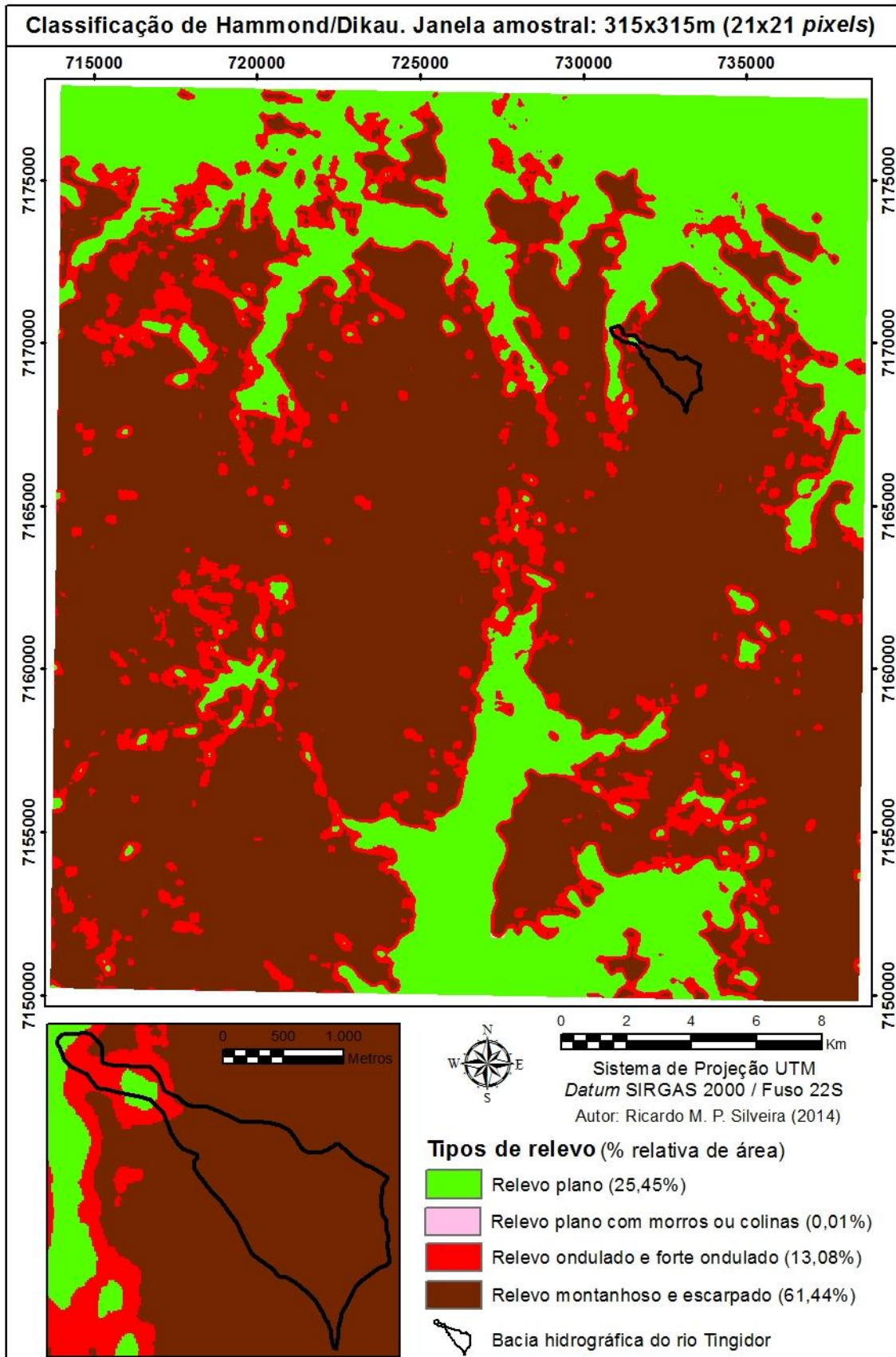


FIGURA 27 – MAPA DE TIPOS DE RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 21X21 PIXELS)

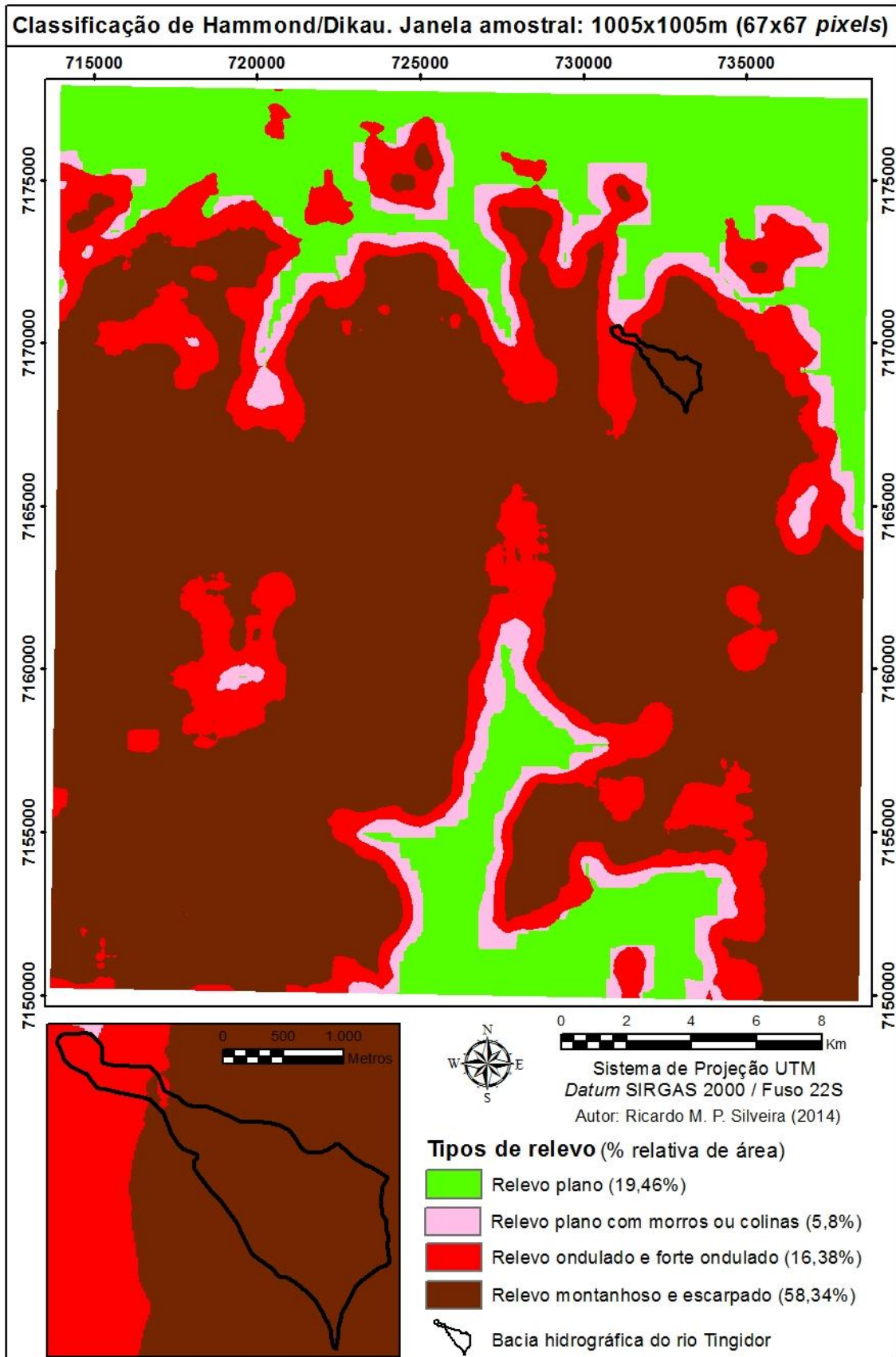


FIGURA 28 – MAPA DE TIPOS DE RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 67X67 PIXELS)

Nos outros dois níveis hierárquicos, devido ao maior número de classes, o efeito da janela móvel é evidenciado pela discrepância e pelo detalhamento entre as feições mapeadas.

A subdivisão dos cinco possíveis tipos de relevo em classes de forma de relevo, agora com a possibilidade de 24 classes, apresentaram resultados completamente distintos entre as três janelas amostrais testadas.

A classificação de menor área de análise (FIGURA 29) apresentou muitos ruídos e, com exceção da classe “planos regulares” que teve êxito ao destacar a planície, todas as demais não se mostraram representativas. Quase 50% da área de estudo foi mapeada pela classe “relevo montanhoso com muito baixa variação altimétrica”, cujo gradiente de elevação desta classe chega a 1380 metros. Alguns topos e cristas foram mapeados como “relevo montanhoso com baixa variação altimétrica”, exemplo do nível de detalhamento alcançado pela janela amostral. Já a classe “relevo montanhoso regular”, que apresenta maior correlação com as características morfológicas locais, ficou restrita a pequenas porções intermediárias, com a representação de “manchas” isoladas sem continuidade – resultado negativo do detalhamento. Das 24 classes possíveis, 9 foram identificadas no recorte.

As diferenças nos resultados obtidos com a variação da janela móvel apontam que, conforme hipótese inicial, dentre as três áreas amostrais testadas, a janela de 21x21 *pixels* (315m x 315m) foi a mais representativa, tendo como critérios a escala utilizada como referência (taxonomia geomorfológica), a qualidade e resolução do MDE e o conhecimento geomorfológico prévio.

Como ilustra a FIGURA 30, esta classificação conciliou os melhores resultados de ambas as janelas amostrais testadas: a detalhada e a generalizada, ainda que muitos problemas tenham sido constatados. Dentre eles, destacam-se as classes mapeadas como bordas de contato ou com pequenos agrupamentos espúrios: planos suaves, planos com colinas, relevo ondulado regular, relevo ondulado com baixa variação altimétrica e relevo ondulado com moderada variação altimétrica.

Quanto aos pontos positivos denotam-se as quatro grandes unidades caracterizadas pelas principais rupturas de declive, representados pelas classes de relevo montanhoso, em quatro níveis de variação altimétrica, relevo ondulado regular e áreas planas.

No outro extremo, a aplicação do método para uma classificação considerando uma área generalizada (FIGURA 31) resultou em 13 classes mapeadas das 24 possíveis para este nível hierárquico. Os níveis de dissecação da Serra do Mar apresentaram melhoras na setorização morfológica e atribuições qualitativas. As áreas de planície também tiveram bons resultados por indicar as variações em área de maior rugosidade dos morros isolados e no contato com as montanhas, ainda que os contornos tenham se mostrado imprecisos. Além disso, para esta escala de representação, a janela se mostrou inadequada por extrapolar os limites suavizados, cujas marcas retangulares da área amostral ficaram bem evidentes na classificação.

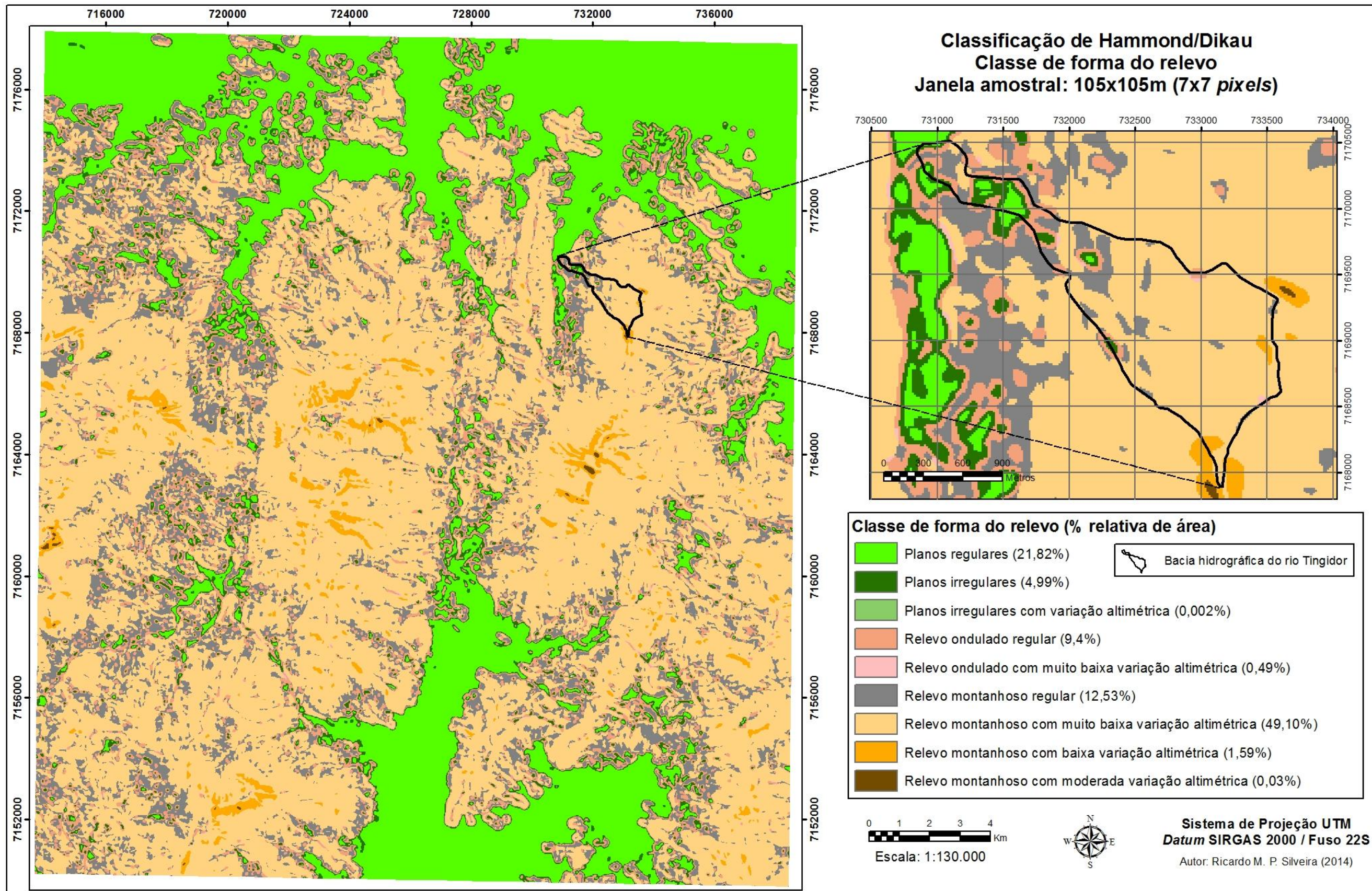


FIGURA 29 – MAPA DE CLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 7X7 PIXELS)

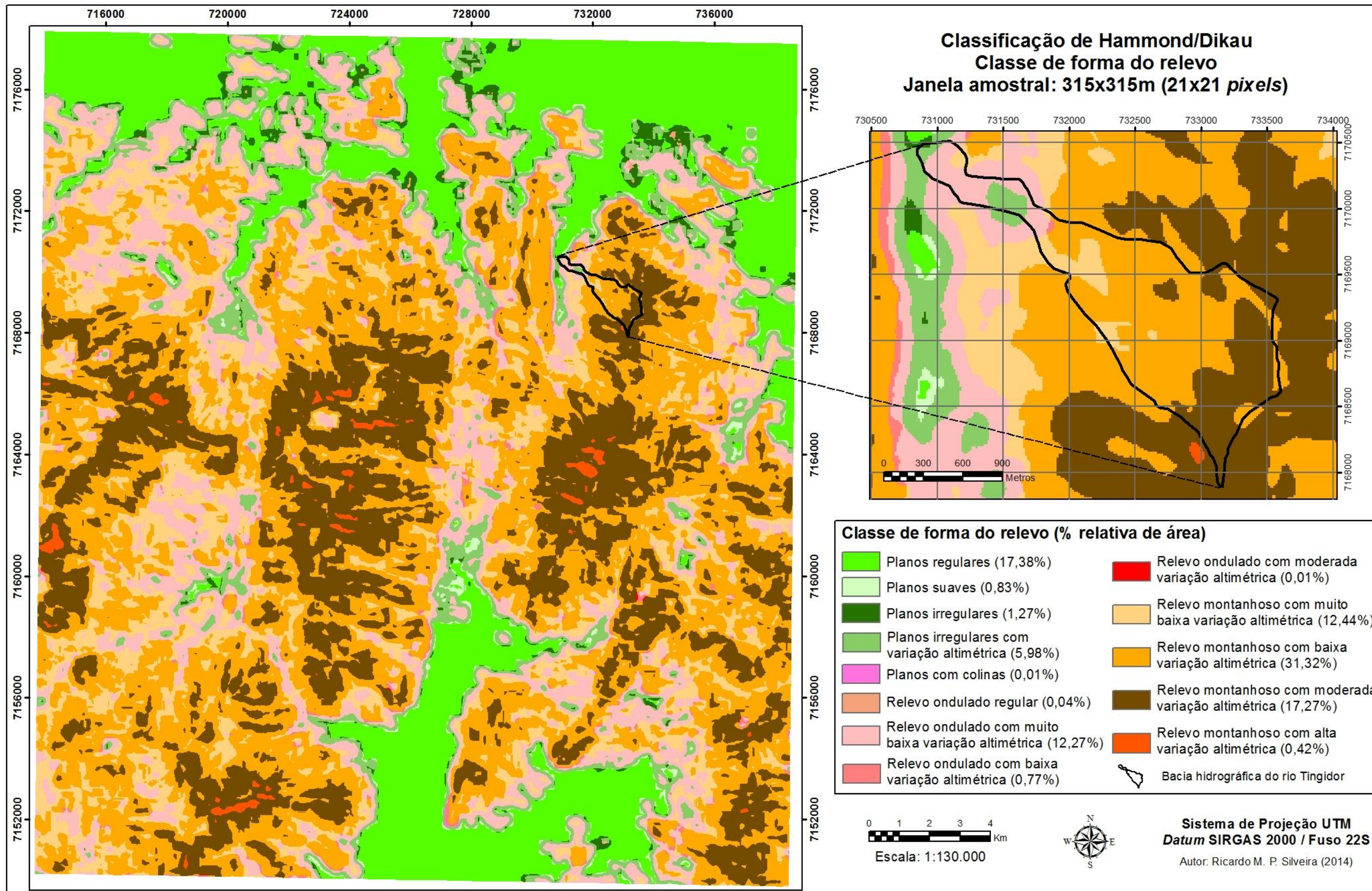


FIGURA 30 – MAPA DE CLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 21X21 PIXELS)

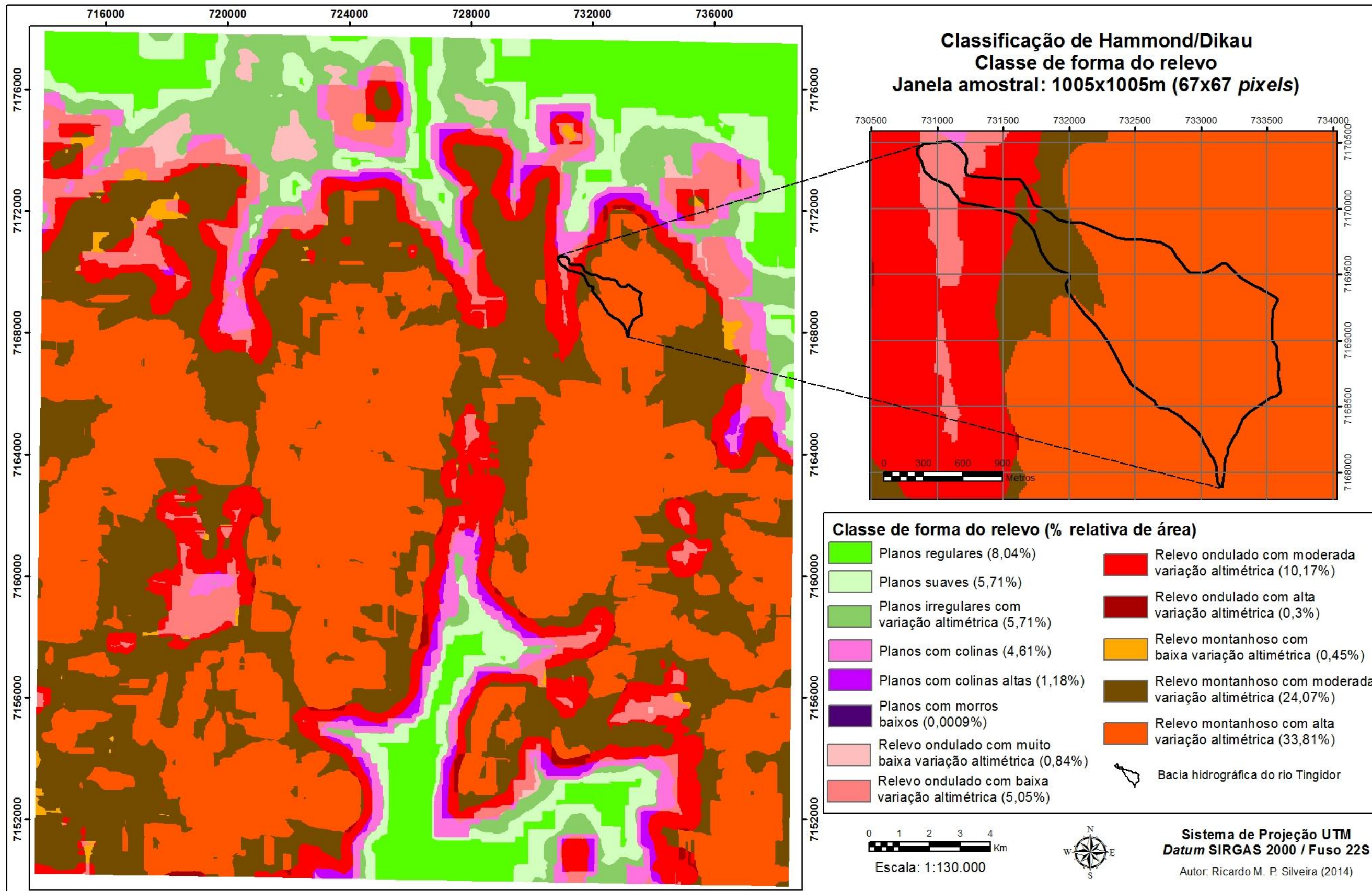


FIGURA 31 – MAPA DE CLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 67X67 PIXELS)



Os resultados dos dois primeiros níveis hierárquicos reforçam o pressuposto de que a diversidade de unidades obtidas nas classificações denota a limitação da proposta na etapa de qualificação dos resultados obtidos em distintas áreas. A nomenclatura para os tipos e classes de relevo, mesmo com adaptações da proposta original, se mostrou pouco representativa para a extensão da área de estudo. As classes podem variar de “montanhoso” para “plano” em um mesmo ponto analisado nas três janelas amostrais testadas. Assim, no experimento, a codificação para as subclasses de relevo na 3ª ordem hierárquica mostrou-se mais adequada pela caracterização das feições mapeadas sem atribuir terminologia específica que pode, ou não, se adequar à mudança de parâmetros ou de área de estudo.

Pelo fato desta classificação considerar todas as combinações entre os atributos topográficos empregados, sem estabelecer agrupamentos, há uma miscelânea de classes que dificulta a leitura do mapa final. Porém, com o auxílio da tabela de referência, que indica o particionamento de cada atributo com seu respectivo código, a caracterização morfométrica é detalhada em termos quantitativos, uma vez que permita a análise visual com intervalos mensuráveis.

A classificação de menor janela amostral (FIGURA 32) identificou 34 de 96 classes possíveis, enquanto a classificação intermediária (FIGURA 33) resultou em 46 subclasses de forma de relevo e a de maior área amostral (FIGURA 34) mapeou 42.

Devido aos problemas decorrentes do efeito de generalização/detalhamento apontados anteriormente, uma alternativa para ajustar os limites e definir as incertezas das classes mapeadas pode ser a utilização de janelas com tamanhos específicos para determinadas áreas, ou seja, janelas amostrais que variam conforme as características topográficas locais. Dessa maneira, a região serrana passaria a ter uma janela com o tamanho adequado à sua configuração morfométrica local, da mesma forma se empregado nas planícies ou outros grandes compartimentos geomorfológicos que apresentam maior homogeneidade.

Para trabalhos posteriores emerge como desafio o acréscimo de informações morfométricas adicionais como a rugosidade do relevo (para delimitação de unidades homogêneas) e comprimento médio das vertentes (para delimitação de feições específicas), que podem auxiliar no processo. Assim, tendo em vista o objetivo do mapeamento, o tamanho da janela móvel pode ser ajustado conforme indicações obtidas pela mensuração dessas variáveis.

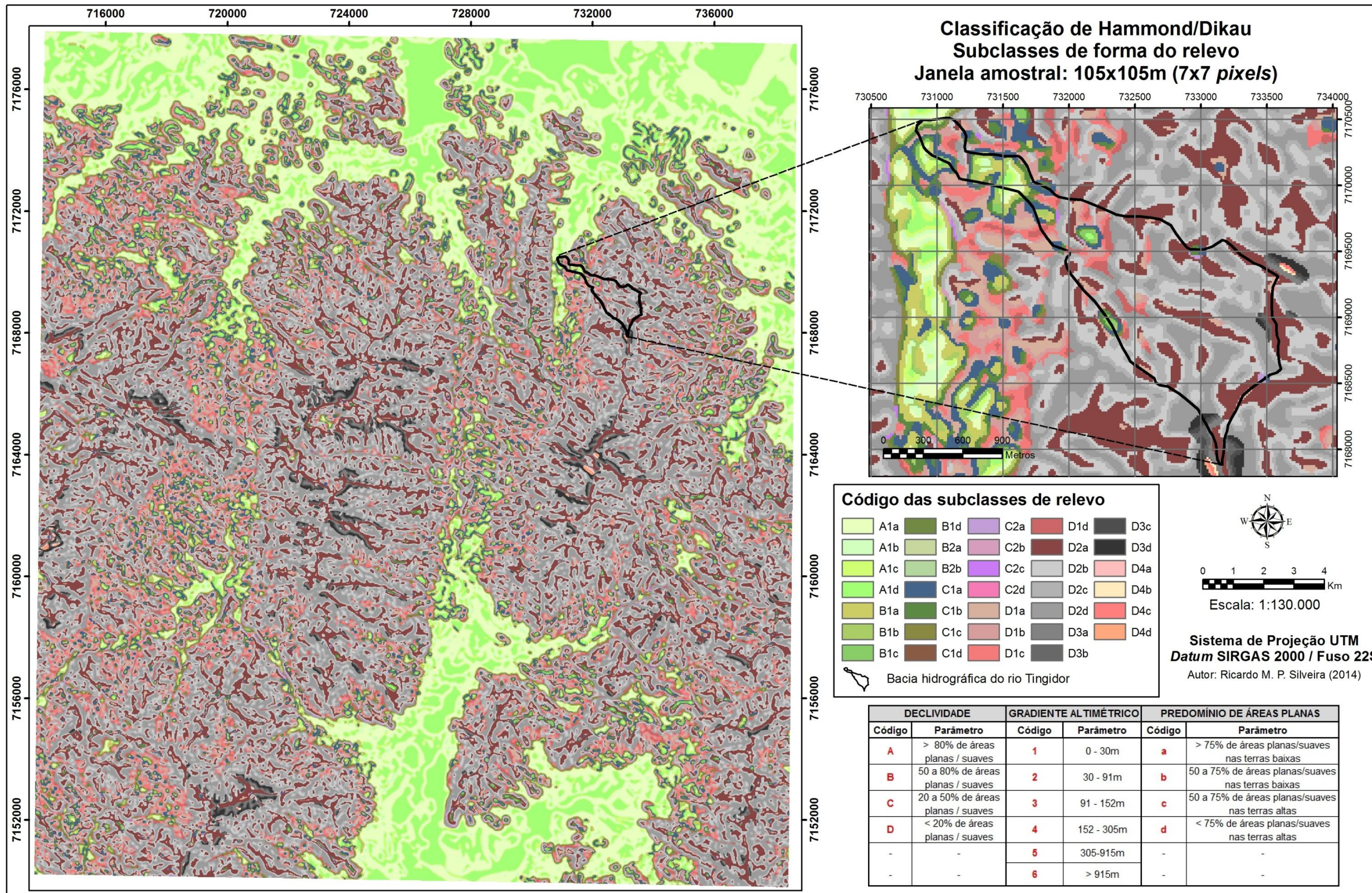


FIGURA 32 – MAPA DE SUBCLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 7X7 PIXELS)

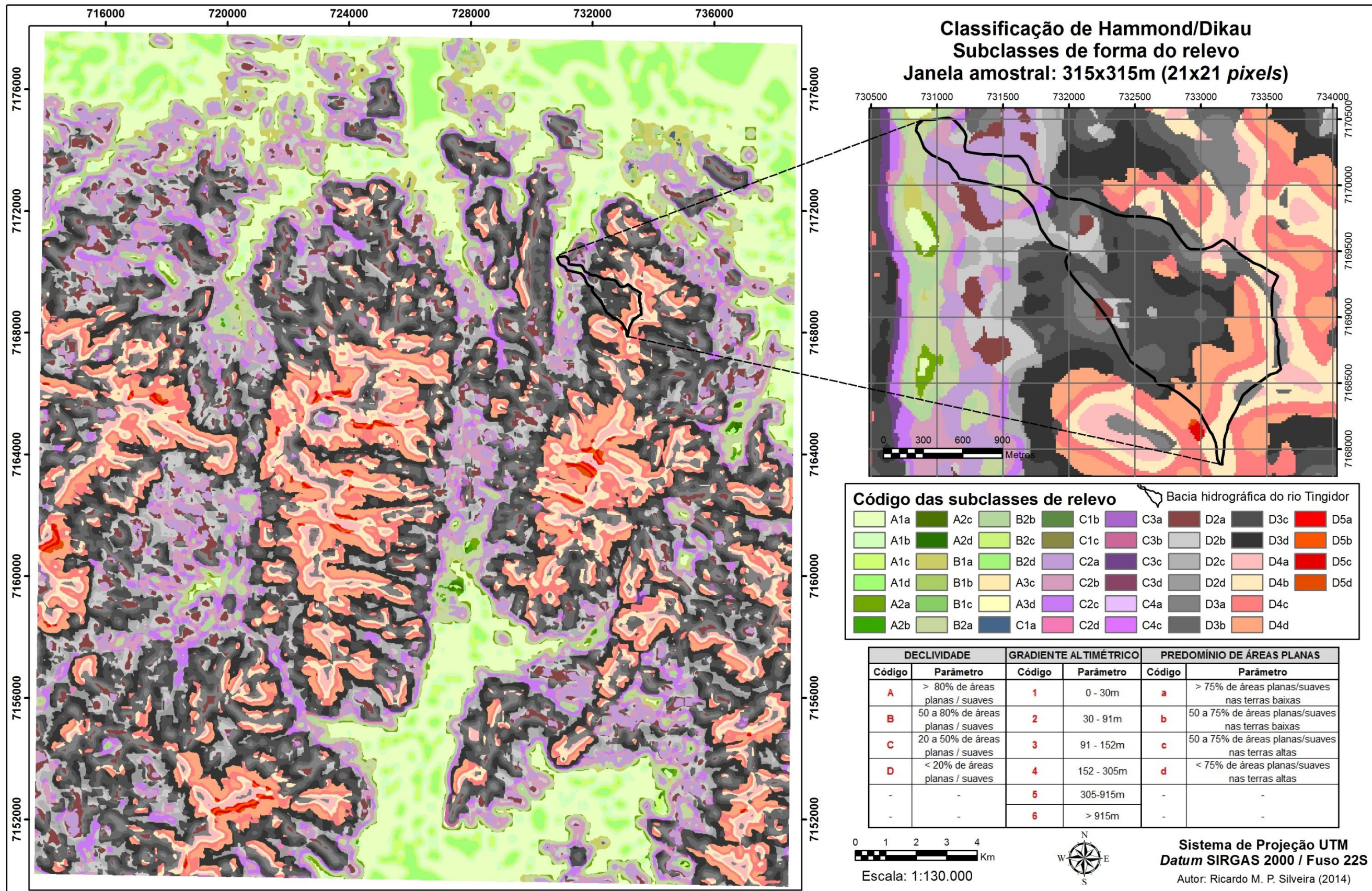


FIGURA 33 – MAPA DE SUBCLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 21X21 PIXELS)

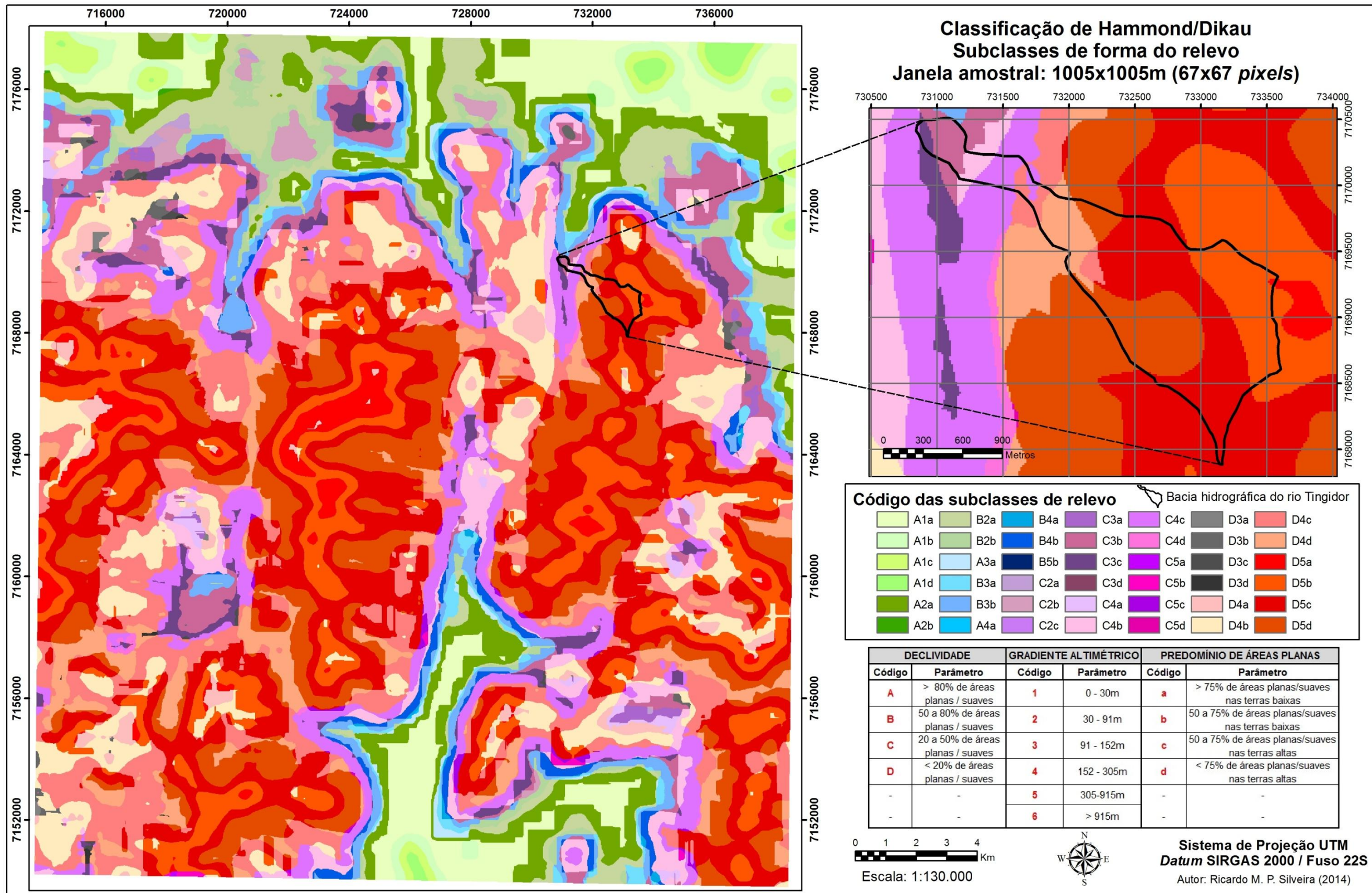


FIGURA 34 – MAPA DE SUBCLASSES DE FORMAS DO RELEVO (JANELA AMOSTRAL DE 67X67 PIXELS)

#### 4.4 MAPAS DA CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOLÓGICA SUPERVISIONADA

Os mapas de unidades de relevo e formas de vertente elaborados são apresentados como mapeamento de unidades adequadas ao 4º e 5º nível taxonômico de Ross (1992), respectivamente. Embora o foco do trabalho seja a aplicação da análise digital do relevo apoiada no cálculo de atributos topográficos derivados de um MDT, as discussões específicas sobre cartografia geomorfológica aparecem de modo secundário.

Pelo fato dos mapas terem como referência o mapeamento geomorfológico do estado do Paraná, em ordem geomorfológica escalar crescente, referente ao 1º nível taxonômico (unidades morfoestruturais), a área de estudo compreende o Cinturão Orogênico do Atlântico. Esta unidade está associada às derradeiras colisões de placas e soerguimento de cadeias montanhosas, cujos corpos dão suporte a grandes setores da Serra do Mar (morfoescultura correspondente ao 2º nível taxonômico), e também abrange a categoria das Bacias Sedimentares Cenozóicas, representada pela morfoescultura denominada Planície Litorânea (2º táxon).

As duas unidades morfoesculturais compreendem quatro subunidades morfoesculturais (3º táxon): a) Serra do Mar Paranaense, cujas formas predominantes são topos alongados e em cristas com vertentes retilíneas e vales em “V” encaixado. A direção geral da morfologia varia entre NE-SW, N-S e NW-SE, modelada em litologias da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico Migmatítico; b) Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas, com predomínio de topos alongados em crista e rampas dissecadas com vertentes retilíneas e vales em “V”, modeladas em rochas da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico Migmatítico; c) Blocos Soerguidos da Serra do Mar, que mantém as características desses dois primeiros com o acréscimo da dissecação muito alta; d) Planície Litorânea e Planícies Flúvio-Marinhas, cujas formas predominantes são as planícies de restinga e flúvio-marinhas, terraços arenosos, dunas e praias, modeladas em sedimentos marinhos e flúvio-marinhas.

#### 4.4.1 Mapa de unidades de relevo

O mapa de formas de relevo (FIGURA 35), elaborado a partir dos melhores resultados derivados das classificações geomorfométricas testadas inicialmente, cujos critérios e classes foram adaptados conforme características geomórficas locais, resultou na identificação de cinco formas de relevo principais (planície, rampas coluvionares, calhas de drenagem, vertentes e cristas) fragmentadas em outras oito adicionais (subdivididas em classes com distintas características morfométricas.), totalizando 13 classes que representam uma classificação detalhada, com as possibilidades de divisões de feições elementares.

A classificação contemplou as principais segmentações morfológicas da área de estudo, com poucos ruídos na classificação. O principal ponto negativo da proposta são as descontinuidades de alguns segmentos das calhas de drenagem, sobretudo na planície, cujo fluxo acumulado dessas áreas é menor que nas vertentes devido à baixa variação de declividade.

Diferentemente das outras propostas apresentadas (classificação de Hammond/Dikau e a classificação do índice de posição topográfica), as classes definidas para o mapa de formas de relevo tiveram as atribuições qualitativas determinadas por retroanálise, ou seja, as regras de classificação foram determinadas com base no conhecimento prévio da área de estudo e das feições de interesse a serem mapeadas para esta escala predeterminada, o que denotou a importância do controle de campo tanto na etapa que antecedeu a modelagem quanto na etapa posterior, de análise e discussão da classificação de formas de relevo.

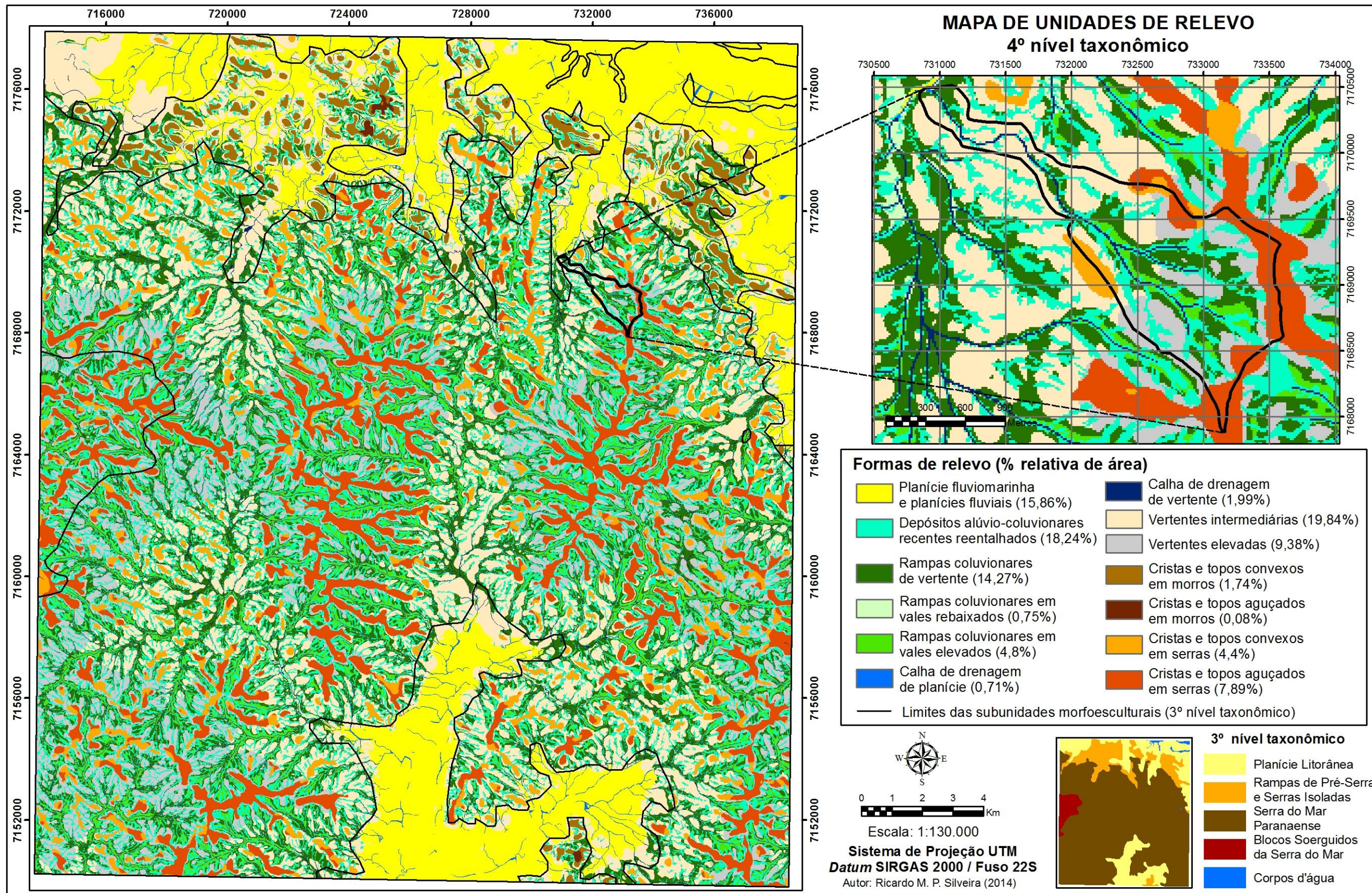


FIGURA 35 – MAPA GEOMORFOLÓGICO DE FORMAS DE RELEVO (4º TÁXON)

Conforme ilustrado pela FIGURA 36, cujos limites são meramente ilustrativos e cuja sub-bacia do rio Tingidor encontra-se centralizada na fotografia, as classes de formas de relevo identificadas se mostraram adequadas tanto em termos de diversidade das feições características presentes na área de estudo quanto de representatividade adequada à escala geomorfológica pretendida, indicando a fragmentação das subunidades morfoesculturais (ou unidades morfológicas).

Em campo constatou-se o potencial de aplicação da classificação para levantamentos preliminares, condizente com as principais rupturas observadas na paisagem, embora as limitações desse modelo se atenham sobretudo na definição dos limites: onde termina uma crista e onde se inicia uma rampa coluvionar, por exemplo. Trata-se, portanto, de êxito na identificação e imprecisão na delimitação.

Essa constatação reforça uma questão central da análise digital do relevo aplicada ao mapeamento de unidades de relevo: a relação interdependente entre a geometria e a topologia, entre o quantitativo e o qualitativo, entre o mensurável e o subjetivo. Referente à imprecisão dos limites obtidos pela classificação, destaca-se essa é uma problemática que emerge da percepção conceitual qualitativa e inevitavelmente acaba sendo transposta para as etapas de atribuição de parâmetros que visam a representação de descontinuidades topográficas. Nesse sentido, denota-se que o mapeamento automatizado reduz a subjetividade em aspectos operacionais, visando a repetibilidade e padronização metodológica, embora o intermédio com as definições qualitativas ainda mantenha o caráter subjetivo do mapeamento.

A FIGURA 37 trás onze exemplos de fotografias espacializadas na bacia hidrográfica do rio Jacareí, local onde se concentraram as etapas de conferência em campo. Em todos os casos, seja na planície ou nos topos da serra, as feições mapeadas pela classificação são facilmente observadas *in loco*, principalmente as cristas (FIGURA 37E), as vertentes (terço médio e terço superior da Serra do Mar, com forte controle estrutural, bem evidenciado pela FIGURA 37F) e a planície (FIGURA 37C, FIGURA 37F e FIGURA 37H). As calhas de drenagem de vertente (FIGURA 37K) também foram representadas de modo fidedigno, com méritos para o MDT *Topogrid* utilizado, ainda que nas porções de baixa declividade (FIGURA 37I) muitos segmentos tenham apresentado descontinuidades.



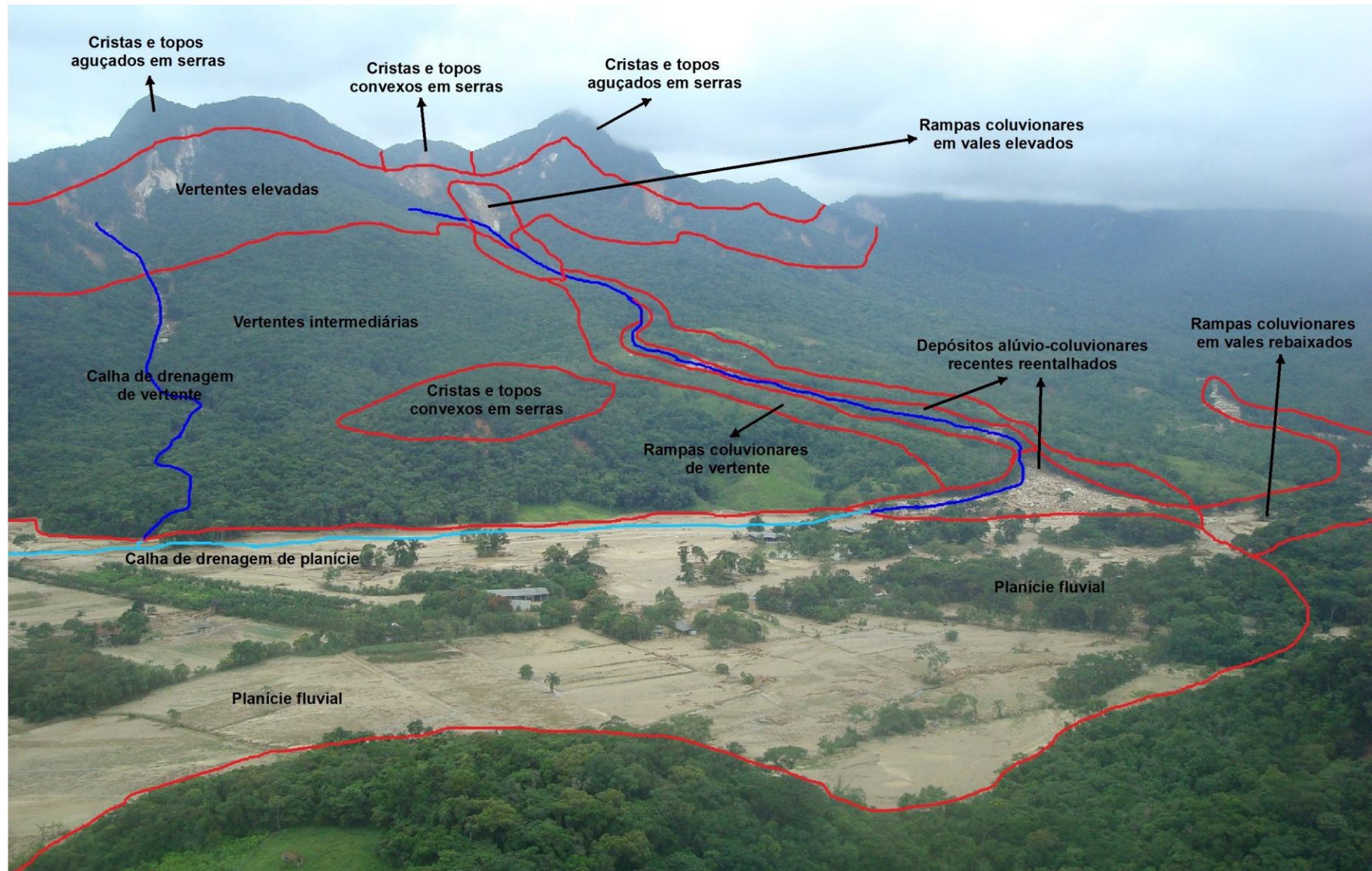


FIGURA 36 - REPRESENTAÇÃO APROXIMADA DE UNIDADES ESPACIALIZADAS. Fotografia: Oscar Salazar Jr. (2011)

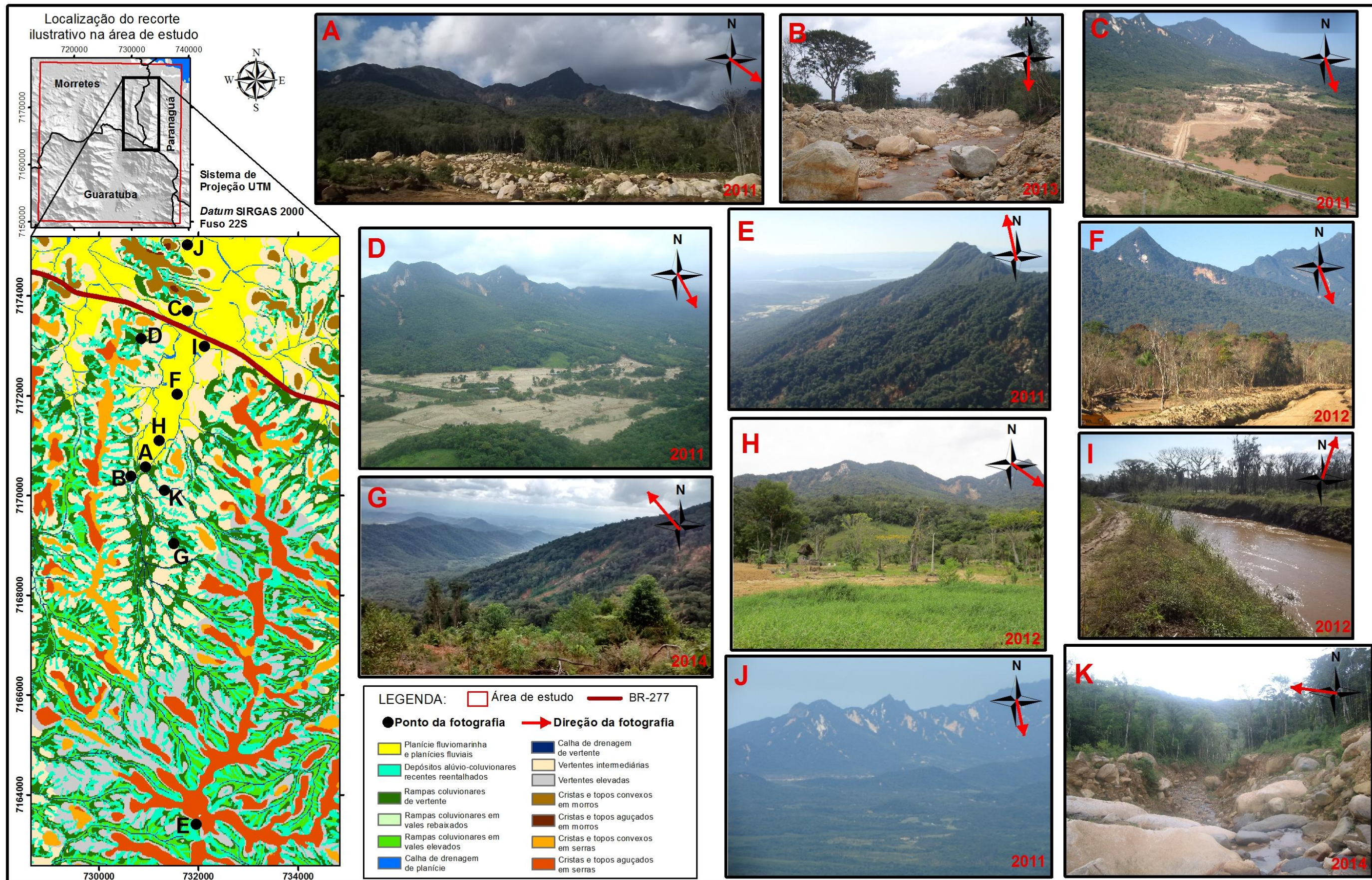


FIGURA 37 - FOTOGRAFIAS GEORREFERENCIADAS NO MAPA DE FORMAS DE RELEVO.  
Fotografias: Ricardo M. P. Silveira, Claudinei T. da Silveira e Oscar Salazar Jr.

Outro exemplo de relação direta entre o modelo e a realidade de campo é ilustrado pela FIGURA 37H, com fotografia orientada a sudeste onde se observam três importantes rupturas na paisagem e identificadas pelo mapeamento: planície, em primeiro plano, uma elevação intermediária, em segundo, classificada como "cristas e topos convexos em serras", e os divisores d'água da bacia hidrográfica, em terceiro plano ao fundo da imagem, com as maiores elevações e declividades.

O mesmo recorte ilustrativo da FIGURA 37 é apresentado em perspectiva 3D com exagero vertical pela FIGURA 38, que demonstra a representação do modelo com todas as 13 classes de formas de relevo. A inserção de parâmetros adicionais para subdivisão geomorfológica se mostrou uma grande vantagem por possibilitar um viés quantitativo na definição de unidades cujas denominações são por vezes dúbias ou vagas. Além disso, com o cálculo de predomínio de vizinhança a parametrização permitiu adequar limites em função do contexto geomorfológico circundante, como para a definição dos topos convexos ou aguçados, devidamente ilustrados no esquema em perspectiva.

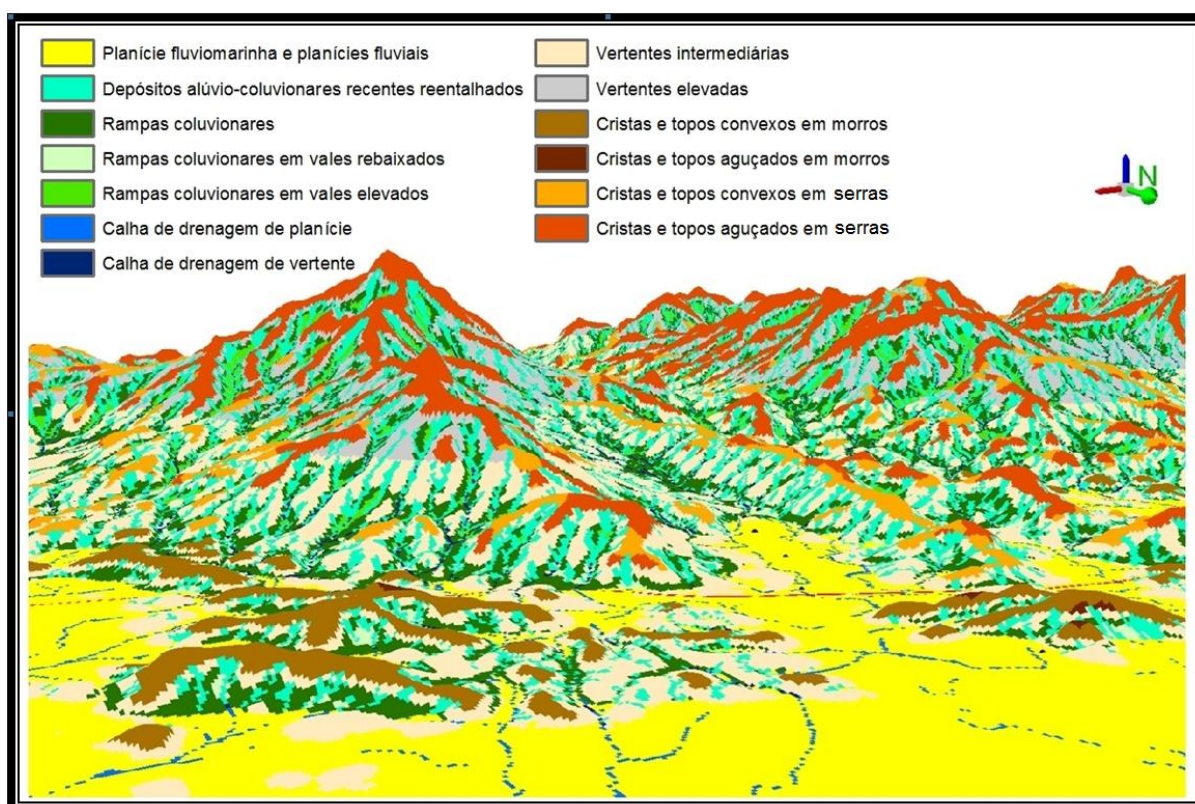


FIGURA 38 - SERRA DA PRATA EM PERSPECTIVA 3D

Comparativamente a FIGURA 39 retrata a classificação em perspectiva 3D, com exagero vertical (FIGURA 39A), e uma fotografia tirada aproximadamente do mesmo ponto de observação (FIGURA 39B), destacando a semelhança entre o modelo e a realidade, com muitas feições discerníveis. Um ponto positivo ilustrado pela figura é o mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa como rampas coluvionares ou depósitos alúvio-coluvionares, classes que observadas a longas distâncias não são passíveis de visualização uma vez que a vegetação oculte cicatrizes de eventos antigos (estas visíveis são do evento de 2011). Destaca-se, ainda, que os *pixels* aparecem grosseiros no modelo em 3D, com resolução muito acima dos 15x15 metros da matriz original, devido às limitações de processamento do *software* quando aplicado exagero vertical.

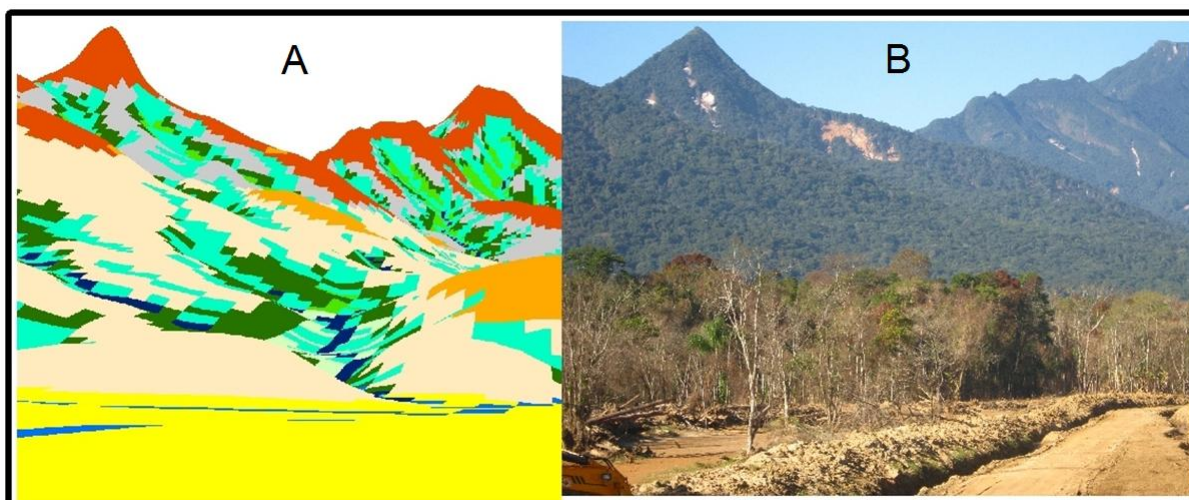


FIGURA 39 - COMPARAÇÃO APROXIMADA ENTRE O MODELO E A REALIDADE DE CAMPO

Uma das principais dificuldades da classificação foi a de separar cristas e topos de serras das cristas e topos de morros, uma vez que em muitos casos as propriedades morfométricas destas duas unidades são semelhantes e a própria qualificação descritiva é imprecisa. Comumente a literatura aponta que morros são elevações que variam de 100 até 300 metros de altitude, entretanto muitas elevações secundárias com essas características são encontradas nas porções intermediárias da Serra do Mar. Daí a necessidade de acrescentar a delimitação do 3º táxon do mapeamento geomorfológico do estado do Paraná como regra de classificação, pois em casos específicos, ligados a aspectos genéticos, apenas a morfometria não é capaz de distinguir formas com origens variadas.

Ademais, independentemente da distinção genética, os morros isolados localizados sobretudo à norte da área de estudo foram todos mapeados satisfatoriamente em contraste ao declive constante da planície (FIGURA 40). Para essa segmentação de grandes unidades geomorfológicas o IPT foi o atributo topográfico que apresentou os melhores resultados, atestado pela aplicação da proposta semiautomatizada em etapa prévia ao mapeamento final de formas de relevo.

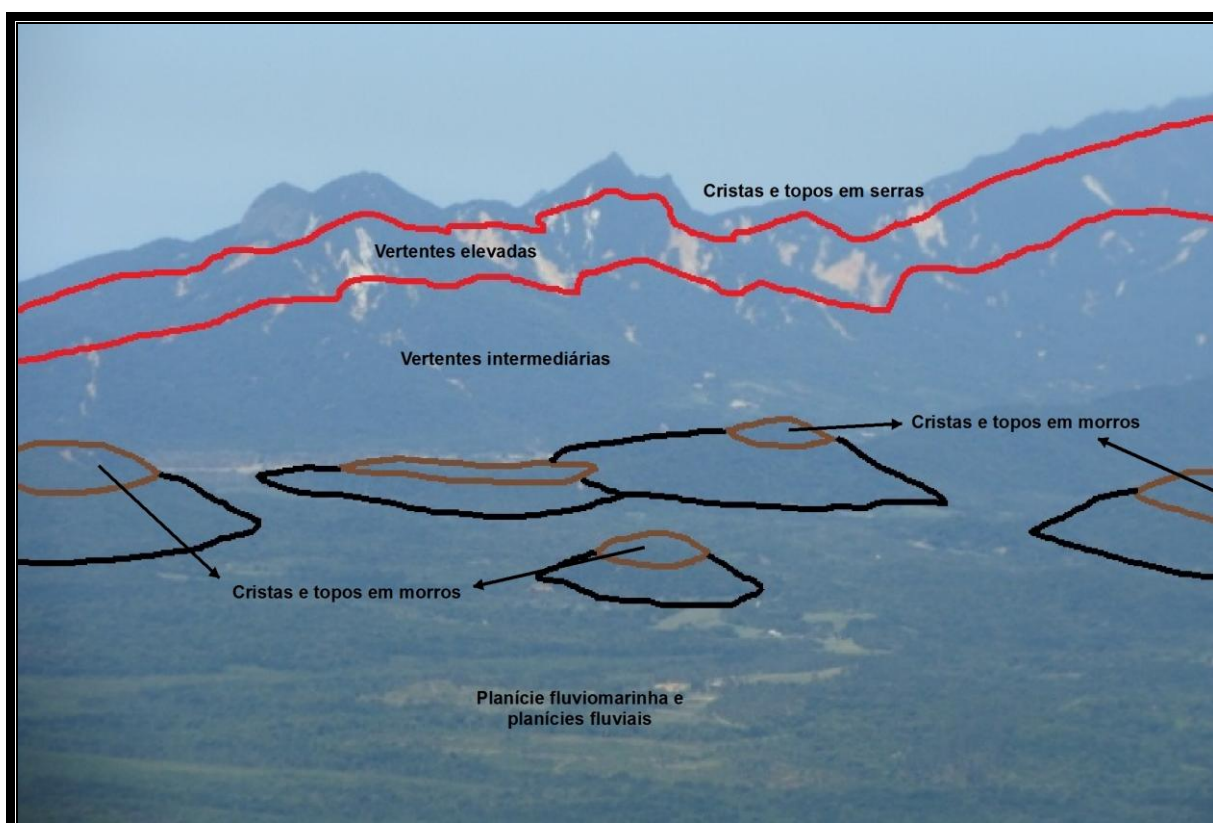


FIGURA 40 - COMPARTIMENTOS HOMOGÊNEOS IDENTIFICADOS NA SERRA DA PRATA

#### 4.4.2 Mapa de formas de vertente

Para o mapa de formas de vertente foram obtidas 27 classes. Devido ao nível de detalhamento, as formas de vertente se mostraram mais sensíveis à qualidade e à escala do modelo. Assim, a análise dos resultados obtidos considera tanto a equidistância das curvas de nível (10 metros) da base cartográfica utilizada como referência para a construção do MDT quanto a janela local de vizinhança (3x3) para o cálculo do plano e perfil de curvatura e da declividade.

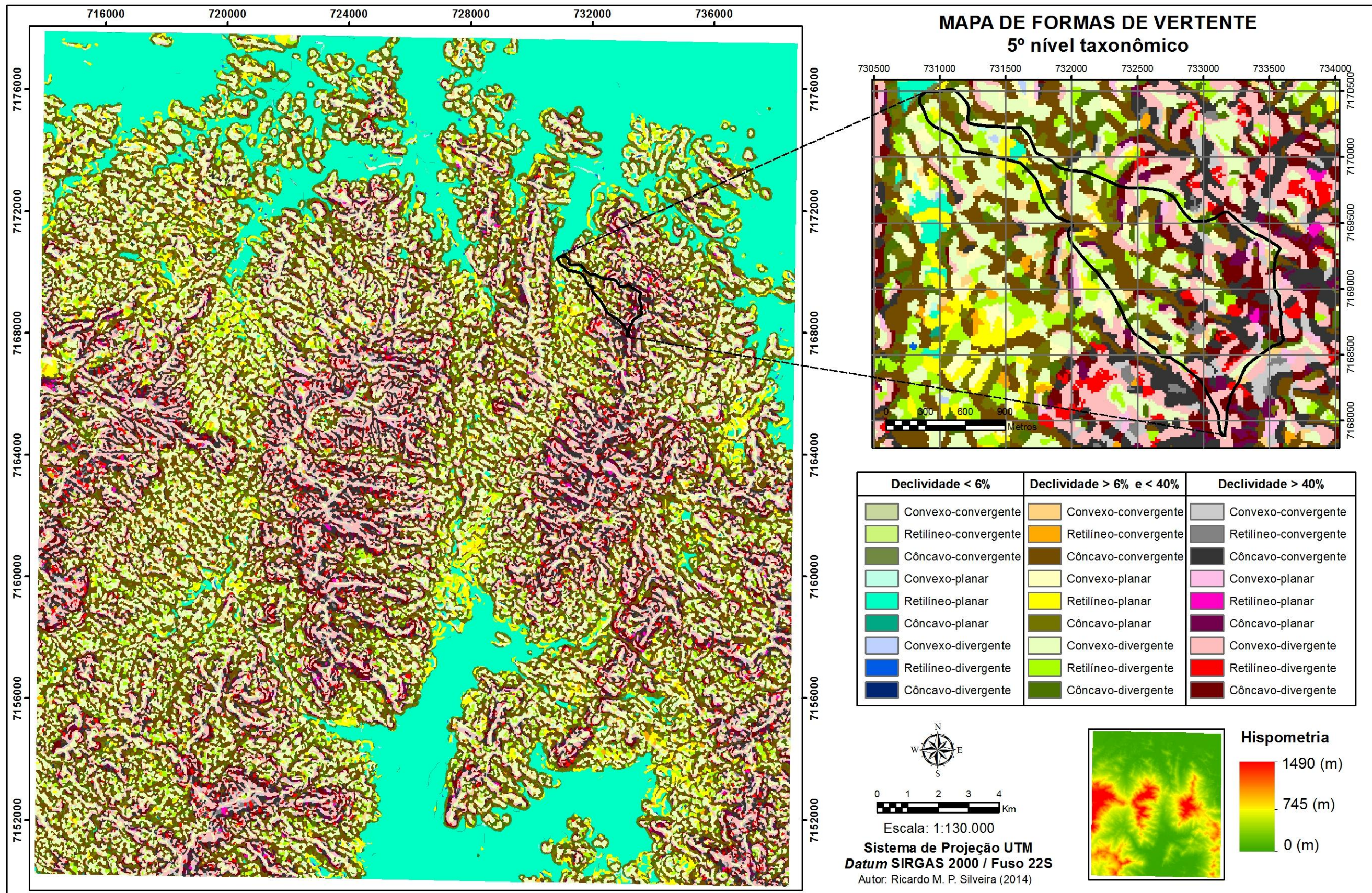


FIGURA 41 – MAPA DE FORMAS DE VERTENTE

O mapa deste nível contempla, portanto, segmentos predominantes de vertente condizentes à escala 1:25.000 que localmente podem apresentar variações não identificadas pela limitação dos dados de entrada.

Devido à sensibilidade da modelagem observada para esta classificação, a alteração de parâmetros, por menores que sejam, desde as etapas iniciais de elaboração do MDT até as regras de classificação, afeta diretamente o produto final. Se por um lado o rigor metodológico deve ser priorizado com ainda mais ênfase, de outro as dificuldades relacionadas à conferência em campo e atribuições qualitativas aumentam proporcionalmente às possibilidades de critérios adotados na classificação ao nível pretendido de semidetalhe, chegando aos segmentos de vertente.

Pelo fato desta classificação considerar segmentos predominantes de vertente, em campo algumas feições são mais facilmente identificadas que outras. A figura 46A, por exemplo, indica a calha do rio Tingidor (fotografia tomada de jusante a montante) mapeada precisamente como segmento côncavo-convergente em toda sua extensão. Oportunamente ressalta-se um aspecto interessante das classificações: embora a base cartográfica utilizada para interpolação do MDT seja de 2002 e os eventos de movimentos de massa tenham ocorrido em 2011, com drásticas mudanças na paisagem local, os modelos indicaram as formas características de relevo que influem na dinâmica dos processos atuantes.

A classe de maior representatividade na área de estudo foi o segmento retilíneo-planar, com declividade inferior a 6%, ilustrado pela figura 46B. Dentre as limitações desta classificação, além da adequação paramétrica, destacam-se a miscelânea de informações e dificuldades de representação em escala compatível e a subjetividade da validação e/ou simples conferência *in loco*. Quanto às potencialidades, destaca-se a possibilidade de integração de variáveis adicionais voltadas para aplicações específicas, voltadas à dinâmica geomorfológica recente.

Destaca-se, também, a dificuldade em estabelecer relações hierárquicas das feições mapeadas entre os níveis taxonômicos. No Mapeamento Geomorfológico do estado do Paraná, os três níveis taxonômicos mapeados representam uma hierarquia: o "Cinturão Orogênico do Atlântico" (1º táxon, unidade morfoestrutural), por exemplo, é constituído pelas unidades morfoesculturais "Serra do Mar" e "Primeiro Planalto" (2º táxon) e estes, na área de estudo, são fragmentados entre outras 10 subunidades morfoesculturais (3º táxon). Entretanto, nos mapeamentos

propostos para esse recorte da Serra do Mar, por exemplo, não seria possível agrupar cicatrizes de deslizamento em uma única classe de forma de vertente. As formas de vertente, por sua vez, também não configuram com exatidão os limites das formas de relevo do mapa de formas de relevo. E estes, por fim, não têm agrupamento específico definido para caracterizar o 3º táxon do mapeamento utilizado como referência.

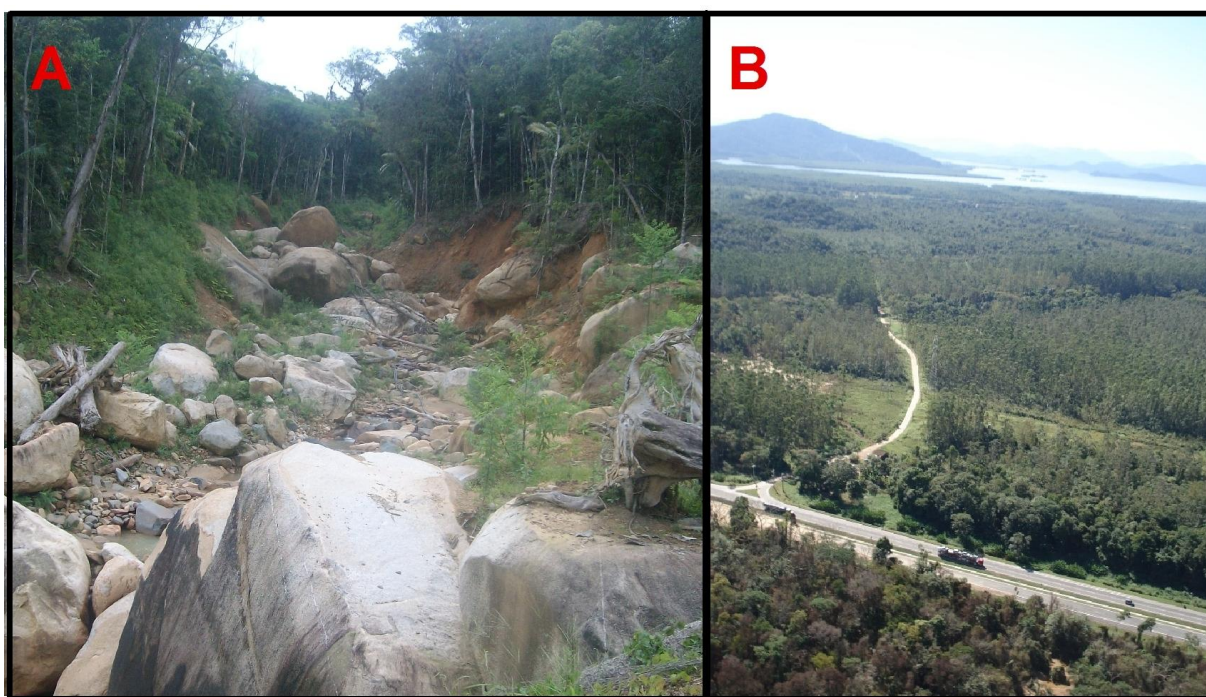


FIGURA 42 - FORMAS DE VERTENTE PREDOMINANTES NA ÁREA DE ESTUDO



## 6 CONCLUSÃO

A aplicação das propostas de classificações geomorfológicas automatizadas com o apoio de variáveis morfométricas evidenciou a possibilidade de realizar levantamentos geomorfológicos preliminares com baixo custo operacional, de maneira exequível, com representatividade na paisagem, contemplando a importância do rigor metodológico para a eficácia da classificação resultante.

O mapeamento realizado permitiu identificar feições e segmentos de relevo destacados na área de estudo, indicando um avanço de escala a partir de técnicas geomorfométricas em relação ao Mapeamento Geomorfológico do estado do Paraná, que atingiu o terceiro nível taxonômico.

Entretanto, ressalta-se que: a) não foi possível estabelecer relação hierárquica taxonômica direta entre as unidades mapeadas, ou seja, tanto o mapa de formas de relevo quanto o de formas de vertente são classificações independentes; b) os produtos finais não configuram mapas geomorfológicos, pois se limitam a aspectos ligados à morfometria e morfografia, não contemplando a morfogênese e morfocronologia, elementos básicos constituintes de um mapa geomorfológico.

Nessa perspectiva, reforça-se que o objetivo da classificação deve condizer com alguns tópicos fundamentais que determinam a aplicabilidade do produto final: a escala da base de dados, a resolução espacial do MDE, o cálculo dos atributos topográficos, o tamanho da janela móvel para cálculos de vizinhança e as regras de classificação parametrizada. Embora os métodos tenham demonstrado potencial para identificar feições geomorfológicas que auxiliam a construção de mapas geomorfológicos, sua aplicação é dependente de parâmetros mutuamente compatíveis e, proeminente, da inclusão de outros atributos topográficos e critérios de particionamento e discretização dos mesmos.

Após todos os testes realizados os resultados apontaram que o MDT *Topogrid*, com os devidos cuidados em relação à definição da resolução horizontal, é adequado para a identificação de feições em escala de semidetalhe pelo ajustamento hidrológico do modelo que auxilia a visualização e interpretação da dinâmica geomorfológica atuante. Dentre os demais MDEs, com resoluções superiores, o *SRTM-X* foi o que apresentou maior correlação com a base

cartográfica utilizada como referência comparativa, ainda que a cobertura desse sensor se restrinja à faixas com intervalos regulares.

Os atributos topográficos que melhor representaram a segmentação geomorfológica da área de estudo foram a declividade, o plano e perfil de curvatura e o índice de posição topográfica. As curvaturas tiveram maior variação conforme a mudança de resolução do MDT, portanto sua aplicação está condicionada ao fator de escala.

Quanto às classificações preexistentes aplicadas, a proposta de Hammond/Dikau se mostrou demasiadamente sensível à variação mínima de parâmetros e não obteve representatividade, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. Entretanto a classificação do Índice de Posição Topográfica obteve êxito no mapeamento mesmo com variação de escala. Por este motivo esta classificação foi a base para a construção da classificação supervisionada, com resultados satisfatórios amparados pelo controle de campo.

O trabalho denotou, também, a necessidade de adaptação dos mapeamentos geomorfológicos tradicionais, documentos complexos e com extensas legendas, no contexto dos SIGs e das geotecnologias, cujas ferramentas possibilitam o processamento, armazenamento e integração de inúmeras variáveis numa plataforma sistematizada. A representação das classificações obtidas foi uma grande dificuldade do trabalho em função do elevado número de classes para um único produto cartográfico utilizando apenas a variável cor.

Embora os resultados evidenciem a tentativa de dar continuidade aos trabalhos de cartografia geomorfológica do estado do Paraná numa pequena área amostral, este trabalho tem caráter introdutório e metodológico, ainda com muitas lacunas para aplicações posteriores e trabalhos futuros na temática da análise digital do relevo que podem subsidiar a construção de mapas geomorfológicos sistematizados para recortes maiores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, 28(2):135-150, 1998.

ANGULO, J. A. mapa do cenozóico do litoral do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 55, p. 25-42, 2004.

BARKA, I.; VLADOVIČ, J.; MÁLIŠ, F. Landform classification and its application in predictive mapping of soil and forest units. **GIS Ostrava**, 1, 23 – 26., 2011.

BIGARELLA, J. J. Contribuição ao Estudo da Planície Litorânea do Estado do Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Jubilee Volume (1946-2001): pp. 65 - 110, 2001.

BISHOP, T. F. A.; MINASNY, B. Digital soil-terrain modelling: the predictive potential and uncertainty. In: GRUNWALD, S. (Ed.), **Environmental Soil–Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics**. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 185–213, 2005.

BOLONGARO-CREVENNA, A.; TORRES-RODRÍGUEZ, V.; SORANI, V.; FRAME, D.; ORTIZ, M. A. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. **Geomorphology** 67 (3-4), p. 407-422, 2005.

BRABYN, L. GIS analysis of macro landform. In: **Proceedings of the Spatial Information Research Centre's 10th Colloquium**. University of Otago, Dunedin, New Zealand, pp. 35–48, 1998.

CAVAZZI, S.; CORSTANJE, R.; MAYR, T.; HANNAM, J.; FEALY, R. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? **Geoderma**, 195–196, p.111–121, 2013.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Ed. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas. UFPR, Curitiba, 2009.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.218–226, 2010.

CHORLEY, R. J.; MAIM, D. E. C.; POGORZELSKI, .H. A. A new standard for measuring drainage basin shape. **American Journal of Science**, v. 255., p. 138-14, 1957.

DE REU, J. *et al.* Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. **Geomorphology**, n. 186, p. 39–49, 2013.

DEHN, M.; GÄRTNER, H.; DIKAU, R. Principals of semantic modeling of landform structures. **Computers & Geosciences** 27, 1011–1013, 2001.

DENG, Y.; WILSON, J. P.; BAUER, B. O. DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. **International Journal of Geographical Information Science**, Vol. 21, No. 2, p. 187–213, 2007.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis. In: RAPER, J. F. (Ed.), **Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems**. Taylor & Francis, London, pp. 51–77, 1989.

DIKAU, R. Geomorphic landform modeling based on hierarchy theory. In: BRASSEL, K.; KISHIMOTO, H. (Eds.), **Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling**. Department of Geography, University of Zürich, Zürich, Switzerland, pp. 230–239, 1990.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. **Landform Classification of New Mexico by Computer**. Open File report 91-634. U.S. Geological Survey, 1991.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. K.; PIKE, R. J. Morphometric landform analysis of New Mexico. **Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband**. 101: 109-126, 1995.

DSG - Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Cartas Topográficas**: folhas 2858-1 NE; 2858-1 SE; 2858-2 NO; e 2858-2 SO. DSG, 2002.

DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, 81, 330–344, 2006.

DRAGUT, L.; SCHAUPPENLEHNER, T.; MUHAR, A.; STROBL, J.; BLASCHKE, T. Optimization of scale and parametrization for terrain segmentation: An application to soil-landscape modeling. **Computers & Geosciences** 35, p. 1875–1883, 2009.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. **Geomorphology** 99, p.1–12, 2008.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F. A semi-automatic method for analysis of landscape elements using Shuttle Radar Topography Mission and Landsat ETM+ data. **Computers & Geosciences** 35, p. 373–389, 2009.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modelling: Acquisition, Manipulation and Applications**. Artech House, Inc., Norwood-Massachusetts. 2005.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2 ed. 306p, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Carta de solos do Estado do Paraná**. Carta MIR-514, SG-22-X-D. Mapeamento sistemático, esc. 1:250.000. 2008.

ESRI. **ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst**. Versão 10.1. Environmental Systems Research Institute, 2010.

ETZELMÜLLER, B.; SULEBAK, J. S. Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology. **Physische Geographie** **41**, 35–58, 2000.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Harper & Row, Publishers, 1972.

EVANS, I. S. Scale-specific landforms and aspects of the land surface. In: EVANS, I.S., DIKAU, R.; TOKUNAGA, E.; OHMORI, H.; HIRANO, M. (Eds.), **Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives**. TERRAPUB, Tokyo, pp. 61–84, 2003.

EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? **Geomorphology** **137** (2012) 94–106, 2012.

EVANS, I. S.; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 497-526, 2009.

FRANKLIN, S.; PEDDLE, D. Texture analysis of digital image data using spatial co-occurrence. **Computers & Geosciences**, **13**(3): p. 293-311, 1987.

GALLANT, J. C.; HUTCHINSON, M. F. **Scale dependence in terrain analysis**. **Mathematics and Computers in Simulation** **43**. p. 313-321, 1997.

GALLANT, A. L.; BROWN, D. D.; HOFFER, R. M. Automated Mapping of Hammond's Landforms. **IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters**, vol. 2, n. 4, p. 384-388, 2005.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista Geografia Acadêmica**, v.2 n.2, p. 73-83, 2008.

GROHMANN, C. H.; SAWAKUCHI, A. O. Influence of cell size on volume calculation using digital terrain models: A case of coastal dune fields. **Geomorphology** **180–181**, p. 130–136, 2013.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: Uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

HANI, A. F. M.; SATHYAMOORTHY, D.; ASIRVADAM, V. S. Computing surface roughness of individual cells of Digital Elevation Models via multiscale analysis. **Computers & Geosciences** **43**, p.137–146, 2012.

HAMMOND, E. H. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale landform mapping. **Ann. Assoc. Am. Geogr.** **54**, 11 19, 1964.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences** **32**, 1283–1298, 2006.

HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, 2009.

HENGL, T.; MACMILLAN, R. A. Geomorphometry - A Key to Landscape Mapping and Modelling. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 433-460, 2009.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v.01, p. 14-47, 1981.

HRVATIN, M.; PERKO, D. Suitability of Hammond's method for determining landform units in Slovenia. **Acta geographica Slovenica**, 49-2, p. 343–366, 2009.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. **Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney**, Australia, 1988.

IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Zoneamento do litoral paranaense**. Curitiba, 1989.

IPPOLITI, G. A.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C. E .G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R.; SOUZA, E. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.269-276, 2005.

IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology** 86(3-4): 409-440, 2007.

JENNESS, J. **Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x**. Jenness Enterprises. Disponível em: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>. 2006.

KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software** xx, p. 1-13, 2007.

LANG, M.; MCCARTY, G.; WILEN, B; AWL, J. Light Detection and Ranging: New Information for Improved Wetland Mapping and Monitoring. **National Wetlands Newsletter**, 32:5, p. 10-37, 2010.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

LUDWIG, R.; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing** 60, p. 339–358, 2006.

MAACK, R. R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Ed. Olympio, 1981.

MACMILLAN, R. A.; PETTAPECE, W. W.; NOLAN, S. C.; GODDARD, T. W. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems** 113, 81–109, 2000.

MACMILLAN, R. A.; JONES, R. K.; MCNABB, D. H. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). **Computers, Environment and Urban Systems** 28 (3), 175–200, 2004.

MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landform and landform elements in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 227-254, 2009.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annaler**, 57A(3–4), 165–177, 1975a.

MARK, D. M. Computer analysis of topography: a comparison of terrain storage methods. **Geografiska Annaler**, 57A(3–4), 179–188, 1975b.

MARK, D. M., SMITH, B. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations. In: Bishop, M.P., Shroder, J.F. (Eds.), **Geographic Information Science and Mountain Geomorphology**. Springer–Praxis, Chichester, England, pp. 75–97, 2004.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física** 04, p. 793-804, 2011.

MARTINONI, D. **Models and experiments for quality handling in digital terrain modelling**. Ph.D. Thesis. University of Zürich, 2002.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M., MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma** 117 (1–2), 3–52, 2003.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/01, 2011.

MIHAI, N. Geomorphometric techniques for landform analysis for pedologic characterization of terrain. **Annals of the University of Craiova – Agriculture, Montanology, Cadastre Series**. Vol. XLII-2012/1, p. 454-460, 2012.

MILIAREISIS, G. C. Quantification of Terrain Processes. In: ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (eds.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlim: Springer-Verlag, pp. 13-28, 2008.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The digital terrain model — theory and application. **Photogrammetric Engineering** 24 (3), 433–442, 1958.

MINÁR, J.; EVANS, I. S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95 (3–4), 236–259, 2008.

MINEROPAR. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**: Escala base 1:250.000 modelos reduzidos. Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

MOURATIDIS, A.; BRIOLE, P.; KATSAMBALOS, K. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 31, n. 23, p. 6205–6222, 2010.

NASCIMENTO JÚNIOR, J. O.; SCHULER, C. A.; CAVALCANTE, R. B. S. Sistema Laser Scanner. **Anais do III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**. Aracaju, 2006.

NELSON, A.; REUTER, H. I.; GESSLER, P. DEM Production Methods and Sources. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 31-64, 2009.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto**: Princípios e Aplicações. Editora Edgar Blücher Ltda. São José dos Campos, 1989.

OKA-FIORI, C., SANTOS, L.J.C., CANALI, N.E., FIORI, A.P., SILVEIRA, C.T., SILVA, J.M.F., ROSS, J.L.S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Curitiba, MINEROPAR, 2006.

PECKHAM, R.; JORDAN, G. (eds.). **Digital Terrain Modelling: Development and Applications in a Policy Support Environment**. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlim: Springer-Verlag, 2007.



PENNOCK, D. J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. **Soil and Tillage Research** 69 (1–2), 15–26, 2003.

PEUCKER, T. K.; DOUGLAS, D. H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Computer Graphics and Image Processing** 4, 375–387, 1975.

PIKE, R. J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. **Math. Geol.** 20, 491–511, 1988.

PIKE, R. J. Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography** 24 (1), 1–20, 2000.

PIKE, R. J.; EVANS, I., HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30, 2009.

RAAFLAUB, L. D.; COLLINS, M. J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. **Environmental Modelling & Software** 21, p.710-732, 2006.

RASEMANN, S.; SCHMIDT, J.; SCHROTT, L.; DIKAU, R. Geomorphometry in mountain terrain. In: BISHOP, M. P., SHRODER, J. F. (Eds.), **GIS & Mountain Geomorphology**. Springer, Berlin, pp. 101–145, 2004.

REUTER, H. I. **ArcGis Geomorphometry Toolbox**: Version 1.0.2. Gisxperts GBR, Germany, 2009.

REUTER, H. I.; NELSON, A. Geomorphometry in ESRI Packages. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 269-292, 2009.

RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain Journal of Sciences**, v.5, n. 1-4, p. 23-27, 1999.

ROMSTAD, B. Improving relief classification with contextual merging. **Proceedings of ScanGIS'2001** — The 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science. Ås, Norway, p. 3–13, 2001.

ROSS, J. S. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Rev. Geografia**. São Paulo, IG-USP, 1992.

SAADAT, H.; BONNELL, R.; SHARIFI, F.; MEHUYS, G.; NAMDAR, M.; ALE-EBRAHIM, S. Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery. **Geomorphology** 100, p. 453–464, 2008.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação

da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, nº 1, 47-60, 2014.

SANTOS, L.J.C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 7, nº2, p. 3-12, 2006.

SCHMIDT, J.; ANDREW, R. Multi-scale landform characterization. **Area** 37, 341–350, 2005.

SCHMIDT, J.; DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models — semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER, H. (Eds.), **GIS for Earth Surface Systems** — Analysis and Modelling of the Natural Environment. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 153–173, 1999.

SCHOORL, J. M.; VELDKAMP, A. Multiscale soil–landscape process modelling. In: GRUNWALD, S. (Ed.), **Environmental Soil–Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics**. CRC Press, Boca Raton, pp. 417–435, 2005.

SEIJMONSBERGEN, A. C.; HENGL, T.; ANDERS, N. S. Semi-automated extraction of geomorphological features using DEMs. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. **Geomorphological Mapping: Methods and Applications**, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. Londres, CRC Press Taylor & Francis, 2008.

SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma** 107 (1–2), 1–32, 2002.

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos**: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais. Tese de doutorado. UFPR. Curitiba, 2010.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J.R.; MIO, G.; Silveira, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí/Paraná. **Sociedade & Natureza (UFU. Online)**, v. 24, p. 623-639, 2013.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Análise digital do relevo empregada no mapeamento de unidades geomorfológicas. **Revista Geografar**, v.7, n.2, p.43-68, 2012.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Emprego de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de relevo apoiado em atributos topográficos e árvore de decisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, nº 1, 87-101, 2014.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKAFIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria**, v.9, n.3, p.317-329, 2008a.

SMITH, B.; MARK, D. M. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. **Environment and Planning B: Planning and Design** 30 (3), 411–427, 2006.

SMITH, M. P.; ZHU, A.; BURT, J. E.; STILES, C. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. **Geoderma** 137, p. 58–69, 2006.

SPEIGHT, J. G. Parametric description of land form. In G. A. Stewart (Ed.), **Land evaluation**, pp. 239–250. Australia: Macmillan, 1968.

SPEIGHT, J. G. Landform pattern description from aerial photographs. **Photogrammetria**, 32, 161–182, 1977.

STRAHLER, A. N. Quantitative slope analysis. **Bulletin of the Geological Society of America** 67, 571–596, 1956.

TAGIL, S.; JENNESS, J. GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje, Turkey. **Journal of Applied Sciences** 8 (6), p. 910-921, 2008.

TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, 33(2): 309-319, 1997.

TOBLER, W. R. The development of analytical cartography — a personal note. **Cartography and Geographic Information Science** 27 (3), 189–194, 2000.

TOMLIN, C. D. **Geographic information systems and cartographic modeling**. Engle wood Cliffs: Prentice-Hall, 1990.

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 1-72, 2004.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 32, p. 300-309, 2011.

VANHONI, F. MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, p.49-63, 2008.

VINK, A. **Land Use in Advancing Agriculture**, vol. X. Springer, New York, NY, 394pp, 1975.

WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, 137, p.107–121, 2012.

WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. Leicester, UK, 1996. 185p. PhD Thesis - University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.47-56, 1987.

ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (eds.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin: Springer-Verlag, 2008.