



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**ALCIONE MOREIRA DO CARMO**

**UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSIDIO PARA ANÁLISE  
MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLOGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL  
DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ**



**FORTALEZA/CE - 2014**



ALCIONE MOREIRA DO CARMO

UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSIDIO PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLOGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção Título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Michael Vandesteem  
Silva Souto

Co-orientadora: Profa. Dra. Cynthia Romariz  
Duarte

Fortaleza/CE  
Novembro/2014.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- C285u Carmo, Alcione Moreira do.  
Utilização do geoprocessamento como subsidio para análise morfométrica e de risco geológico das serras da porção sul do Maciço Central do Ceará / Alcione Moreira do Carmo.– 2014.  
126 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2014.  
Área de Concentração: Geologia Ambiental.  
Orientação: Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto.  
Coorientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte
1. Geoprocessamento. 2.Variáveis morfométricas. 3.Erosão - risco. I. Título.

ALCIONE MOREIRA DO CARMO

UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSIDIO PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLOGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção Título de Mestre em Geologia.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará

---

Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte (Co-Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Rúbson Pinheiro Maia  
Universidade Federal do Ceará

A minha mãe que sempre esteve ao meu lado,  
e aos que de alguma forma tentaram me  
prejudicar...

## **AGRADECIMENTOS**

Dois anos se passaram e nesse período fiz uma dissertação e alguns amigos que irei levar para sempre, e meus orientadores Michael Souto e Cynthia Duarte, certamente estão nessa lista. Quero agradecer a eles pela atenção e a paciência que tiveram comigo, quero agradecer também aos meus antigos e eternos orientadores Wagner Amaral e Vanda Claudino pelas contribuições que deram a minha vida acadêmica.

Quero agradecer aos meus amigos que me socorreram nos momentos de desespero, Áquila que me acompanhou no campo, Gledson pelas consultorias em Geoprocessamento. Quero agradecer ainda a Rosa Maranhão, Pâmella Moura, Queilane, Vânia, Dillano, João Pitombeira, Evilarde, a todos os colegas do GEOCE, pela ajuda e apoio que sempre me deram. As minhas amigas lindas e pacientes que sempre aguentaram os meus surtos durante esse período, Valdete, Claudiana e Pamela.

Agradeço aos professores e funcionários do Departamento de Geologia pela atenção que sempre me dedicaram e ao Programa de Pós-graduação em Geologia pelo apoio financeiro para os trabalhos de campo. Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela Bolsa de Pesquisa que possibilitou a realização desse trabalho e ao apoio do Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará.

## RESUMO

A dissertação em questão trata do uso das técnicas de Geoprocessamento aplicada à análise morfométrica e de risco a erosão nas serras da porção Sul do Maciço Central do Ceará. As serras em questão estão localizadas na região Centro-Sul do Estado do Ceará, entre os municípios de Acopiara, Piquet Carneiro, Mombaça e Catarina. A área compreende um conjunto de relevo com topografias entre 500 m a pouco mais de 800 m de altitude. Essas serras são sustentadas por litologias variadas – quartzitos, gnaisses, migmatitos e granitos, a região também apresenta um contexto tectônico/estrutural com muitas deformações relacionadas com as zonas de cisalhamentos. As encostas desses relevos possuem declives bastante acentuados, fato que denota preocupação com a erosão e a estabilidade nessas vertentes. O uso e ocupação do solo é basicamente aplicado para agricultura tradicional. Para entender melhor o comportamento geomorfológico da evolução dessas serras e se determinar os riscos inerentes a topografia acidentada da área de estudo foram utilizadas técnicas de Geoprocessamento, como uso de multitudes de sensores remotos e as ferramentas do SIG. Para isso foram analisados, por meio do ArcGIS 10.1<sup>®</sup> quatro variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal) a partir de MDE de dados distintos (ASTER-GDEM, SRTM e Topodata). Os primeiros resultados obtidos foram apresentados sob forma artigo, aceito pela Revista Brasileira de Cartografia, que traz a discussão sobre a melhor relação dado/escala para análise das variáveis morfométricas. Isso possibilitou o direcionamento da escolha do MDE Topodata para gerar as variáveis morfométricas empregadas na análise de risco a erosão realizada na área de estudo. Essas variáveis antes de serem utilizadas como base de cálculo do mapa de risco a erosão, passaram por uma validação realizada por meio de trabalho de campo.

Palavras-chave: Serras, Geoprocessamento, MDE, Variáveis morfométricas, Risco de erosão.

## ABSTRACT

The dissertation in question treats about GIS techniques applied to morphometric and erosion risk analysis used on ridges located in the southern portion of the Massif Central of Ceará. The ridges in question are located in the South Central region of Ceará State, between the towns of Acopiara, Piquet Carneiro, Mombaça and Catarina. This area contains a set of topographic reliefs between 500 meters to a little more than 800 meters high. These ridges are supported by various lithologies - quartzites, gnaisses, migmatites and granites, this region also features a tectonic/structural context with many deformations related to shear zones. The slopes of these reliefs are all very steep, a fact that denotes concern about erosion and stability in these slopes. The use and occupation of these lands are basically applied to traditional agriculture. To better understand the geomorphological behavior of the evolution of these ridges and to determine the risks inherent to the rugged topography of the study area we used geoprocessing techniques, such as using multi-data remote sensing and GIS tools. To better understand the geomorphological behavior of the evolution of these ridges and to determine the risks inherent to the rugged topography of the study area we used Geoprocessing techniques, such as multi-data remote sensing and GIS tools. For that four morphometric variables, through ArcGIS 10.1®, were analyzed (slope, vertical and horizontal curvatures) from DEM distinct data (ASTER-GDEM, SRTM and Topodata). The first results were presented in an article, accepted by the Brazilian Journal of Cartography, which brings the discussion about the best data/scale ratio for morphometric variables analysis. This allowed to direct the choice of MDE Topodata to generate the morphometric variables used in erosion risk analysis performed in the study area. These variables before being used as calculation basis for the erosion risk map, passed through a validation performed by field survey.

Keywords: Ridges, Geoprocessing, DEM, morphometric variables, erosion risk



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Mapa de localização da área de estudo.....	18
Figura 02 – Esquema da razão entre escoamento, infiltração e nível de declividade do terreno.....	23
Figura 03 – Esquema das formas do a partir da associação dos tipos de curvaturas vertical e horizontal.....	24
Figura 04 – Mapa dos pontos visitados em campo.....	30
Figura 05 – Mapa geológico da área de estudos.....	39
Figura 06 – Mapa Hipsométrico, elaborado a partir do MDE Topodata.....	43
Figura 07 – Mapa de solos da área de estudos.....	45
Figura 08 – Mapa de vegetação da área de estudos.....	46
Figura 09 – Mapa de bacias hidrográficas e drenagem.....	48
Figura 10 – Mapa de declividade com perfis de validação.....	70
Figura 11 – Perfil 1, validação de declividade.....	71
Figura 12 – Perfil 2, validação de declividade.....	72
Figura 13 – Perfil 3, validação de declividade.....	73
Figura 14 – Perfil 4, validação de declividade.....	74
Figura 15 – Perfil 5, validação de declividade.....	74
Figura 16 – Mapa de Orientação de Vertentes.....	76
Figura 17 – Ponto 1, Validação das orientações das vertentes da parte central da área de estudos, registro feito a partir do topo da Serra do Fonseca.....	77
Figura 18 – Ponto 2, Validação das Orientações das vertentes da porção mais ao norte da serra do Flamengo, registro feito a partir do topo da serra de São Miguel.....	77
Figura 19 – Mapa de Curvatura Vertical.....	79
Figura 20 – Perfil 1, validação de curvatura vertical.....	80
Figura 21 – Perfil 2, validação de curvatura vertical.....	81
Figura 22 – Perfil 3, validação de curvatura vertical.....	82
Figura 23 – Perfil 4, validação de curvatura vertical.....	83
Figura 24 – Perfil 5, validação de curvatura vertical.....	83
Figura 25 – Perfil 6, validação de curvatura vertical.....	84
Figura 26 – Perfil 7, validação de curvatura vertical.....	85
Figura 27 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente.....	86

Figura 28 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente.....	87
Figura 29 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente.....	88
Figura 30 – Mapa de curvatura horizontal.....	89
Figura 31 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente.....	90
Figura 32 – Esquema de combinação das curvaturas vertical horizontal para representar a morfologia do terreno.....	92
Figura 33 – Sequência de alteração mineral e susceptibilidade ao intemperismo.....	94
Figura 34 – Composição da vertente “normal ou regular” de Derruau. A área pontilhada indica o manto de regolito.....	95
Figura 35 – As nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968).....	96
Figura 36 – Mapa dos perfis representativos das encostas das serras do Papagaio, São Miguel, do Fonseca, Maia e Flamengo, respectivamente.....	99
Figura 37 – Mapa de avaliação de risco a erosão baseado na morfologia do terreno dada pelas variáveis morfométricas, declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal.....	102
Figura 38 – Mapa de avaliação de riscos a erosão, baseando-se nas variáveis morfométricas, vegetação, solo, densidade de lineamentos e geologia.....	106
Figura 39 – Mapa de cobertura e uso da Terra feito a partir de classificação supervisionada da imagem Landsat 8.....	109
Figura 40 – Mapa de avaliação de risco à erosão baseado na morfologia do terreno dada pelas variáveis morfométricas.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classes de declividades e níveis de inclinação do terreno.....	22
Tabela 02 – Descrição das nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968) da Figura 35.....	96
Tabela 03 – Tabela dos valores estabelecidos para definir o intervalo classes na definição dos níveis de riscos para as figuras 38, 39, 40.....	98
Tabela 04 – Tabela das influências (%) e dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular o risco de erosão baseando-se na morfologia do terreno (Figura 37).....	100
Tabela 05 – Tabela das influências (%) e dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular o risco de erosão baseando-se nas variáveis morfométricas, vegetação, solo, densidade de lineamentos e geologia (Figura 38).....	103
Tabela 06 – Tabela das influências (%) e dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular o risco de erosão baseando-se na morfologia e na cobertura e uso da Terra (Figura 40).....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i> (Agência Espacial Italiana)
ASTER-GDEM	<i>Aster Global Digital Elevation Model</i>
BR	Brasil
CARAER	Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão
CARMONE	Carta de Avaliação do Risco Morfológica Natural à Erosão
CARNE	Carta de Avaliação do Risco Natural à Erosão
CE	Ceará
CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
DLR	<i>Docklands Light Railway</i> (Agência Espacial Alemã)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EOS	<i>Earth Observing System</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MCC	Maciço Central do Ceará
MDE	Modelo Digital de Elevação
METI	<i>Ministry of Economy, Trade, and Industry</i> – Japão
N	Norte
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – USA
NE	Nordeste
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i> - USA
PDI	Processamento digital de imagem
PLGB	Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil
S	Sul
SAD 69	<i>South American Datum 1969</i>
SAR	Radar de Abertura Sintética
SR	Sensoriamento Remoto
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SW	Sudoeste

USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS 84	<i>World Geographic System</i>
ZC	Zona de Cisalhamento
ZCA	Zona de Cisalhamento de Aiuaba
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCO	Zona de Cisalhamento Orós
ZCSP	Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO .....	15
1.1 – Apresentação .....	16
1.1.1 – Localização e Vias de Acesso .....	17
1.2 – Justificativa.....	19
1.3 – Fundamentação Teórica .....	20
1.4 – Objetivos .....	25
2 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
2.1 – Materiais.....	27
2.2 – Levantamentos Cartográfico e Bibliográfico .....	28
2.3 – Etapa de Campo.....	29
2.3.1 – Primeiro Levantamento de Campo.....	29
2.3.2 – Segundo Levantamento de Campo.....	31
2.4 – Etapa de Laboratório.....	32
2.4.1 – Geoprocessamento.....	32
2.4.2 – Derivação das variáveis morfométricas.....	33
2.4.3 – Mapas de Avaliação de Risco a Erosão.....	34
3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDOS .....	37
3.1 – Geologia Regional .....	37
3.1.1 – Província Borborema.....	37
3.1.2 – Complexo Cruzeta.....	39
3.1.3 – Complexo Ceará.....	40
3.1.4 – Magmatitos Neoproterozóicos .....	41

3.2 – Geomorfologia.....	42
3.3 – Solo e Cobertura Vegetal .....	44
3.4 – Fatores climáticos e Hidrografia .....	47
4 – ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS DA REGIÃO SERRANA DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ GERADAS ATRAVÉS DOS MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA.....	51
5 – VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS COMO SUBSIDIO À ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE AO RISCO GEOLÓGICO A EROSÃO.....	67
5.1 – Validação em campo dos mapas das variáveis morformétricas .....	68
5.1.1 – Declividade .....	69
5.1.2 – Orientação de Vertentes.....	75
5.1.3 – Curvatura Vertical .....	78
5.1.4 – Curvatura Horizontal.....	85
6 – AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO UTILIZANDO VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS .....	91
6.1 – A morfologia das encostas e os processos erosivos .....	93
6.2 – Avaliação de Risco a Erosão nas Serra da Porção Sul do Maciço Central.....	97
6.2.1 – Carta de Avaliação do Risco Morfológico Natural à Erosão (CARMONE).....	100
6.2.2 – Carta de Avaliação do Risco Natural à Erosão (CARNE) .....	103
6.2.3 – Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão (CARAER) .....	107
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	113
REFERÊNCIAS .....	116
ANEXO.....	123

---

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUÇÃO GERAL**

---



## **1 – INTRODUÇÃO**

A dissertação em questão foi planejada para ser apresentada de forma mista, a primeira parte está na forma de artigo científico, a segunda parte na forma de validação dos dados das variáveis morfométricas e a terceira parte na forma de discussão da avaliação de risco a erosão na área de estudo, onde foram apresentadas três propostas de cartas de risco.

O primeiro artigo já foi aceito para publicação na Revista Brasileira de Cartografia. Esse trabalho trata de uma análise qualitativa e comparativa das variáveis morfométricas de declividade, orientação de vertente, curvatura vertical e horizontal, geradas a partir dos MDE SRTM, ASTER-GDEM e Topodata, onde esses produtos foram apresentados em três escalas diferentes.

Os capítulos seguintes irão tratar da validação realizada em campo dos dados das variáveis morfométricas geradas a partir do MDE Topodata e da avaliação de risco a erosão do terreno. Essa avaliação de risco será realizada através de cartas na escala de 1:100.000 confeccionadas a partir da integração das variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertente, curvatura vertical e horizontal) e também através de outras variáveis como os cobertura e uso da Terra (água, vegetação fechada, vegetação aberta, áreas de cultivos e solo exposto), geologia, densidade de lineamentos, hipsometria, solo e vegetação.

### **1.1 – Apresentação**

O Estado do Ceará, Nordeste do Brasil, possui formações Geomorfológicas diversificadas, compostas por praias, tabuleiros, chapada, *cuestas*, *glintes*, Depressão Periférica, Serras Úmidas e Serras Secas. As diferenças topográficas mais significativas estão localizadas em alguns setores, a exemplo dos setores Oeste, Norte a exemplo do maciço de Baturité e Uruburetama e Sul do Estado, que são mais elevados que nas demais regiões, abrigando formas de relevos peculiares ainda pouco explorados pela ciência Geomorfológica.

A região Centro-Sul do Estado do Ceará abriga algumas áreas com topografia mais acentuada que se destacam na paisagem, esses enclaves são as serras que compõem o “Maciço Central do Ceará” (MCC) e outros pequenos maciços. Essas serras são classificadas como secas em virtude da sua localização e, sobretudo pelos elementos naturais que compõem a

paisagem, como o clima e principalmente os tipos de solos e da vegetação característica (CLAUDINO-SALES, 1993).

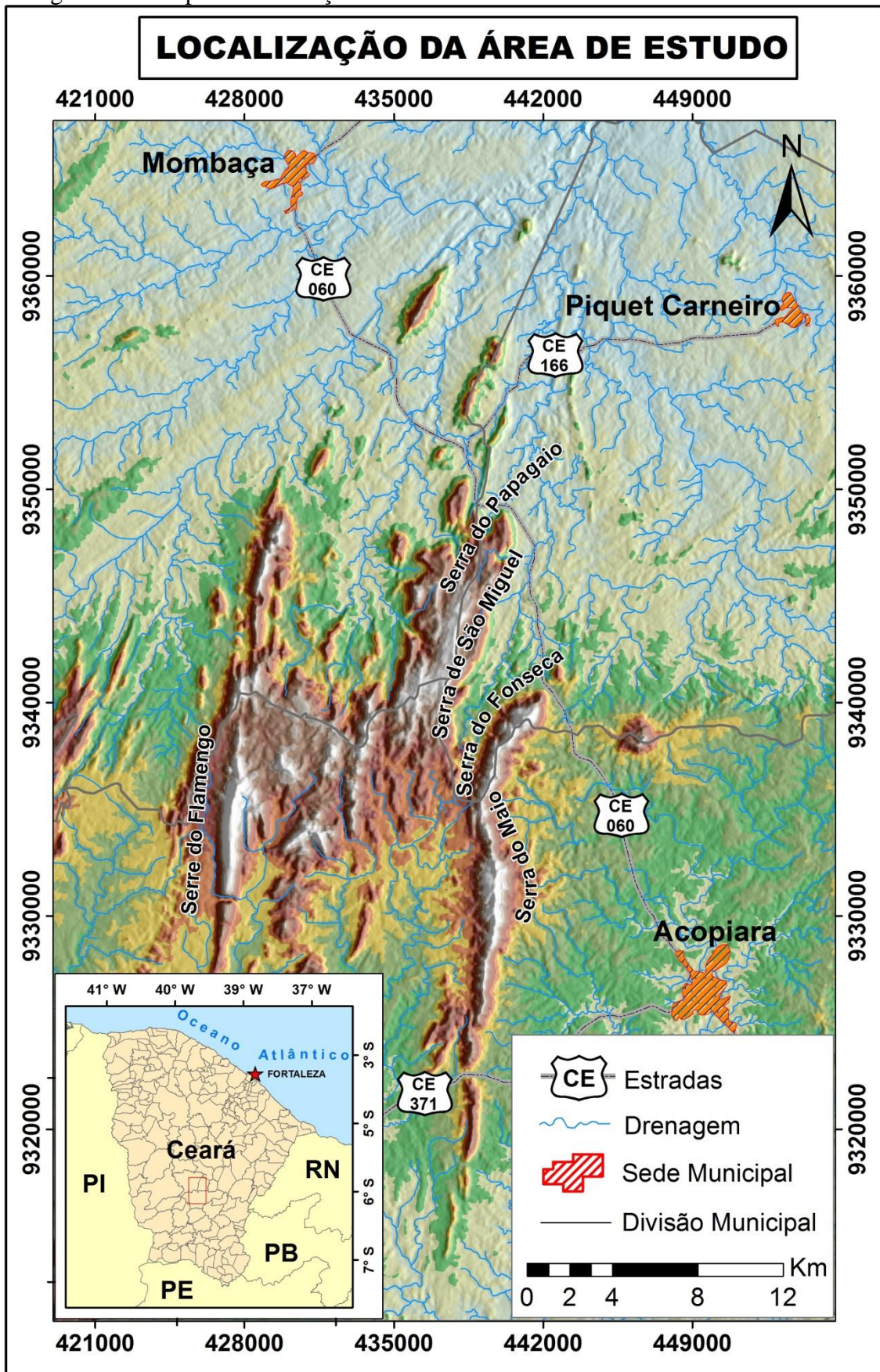
A porção Sul do MCC apresenta altimetrias relativamente elevadas em comparação aos outros pequenos maciços cearenses, que não ultrapassam a cota de 600 m (SOUZA, 1988). As serras que integram esse maciço possuem altitudes que variam entre 500 m a pouco mais de 800 m, podendo chegar até 828 m na Serra do Fonseca, ponto culminante da região. Essas elevações fazem parte da paisagem entre os municípios de Acopiara, Piquet Carneiro e Mombaça, sendo as principais denominadas localmente de Serra do Maia, Serra do Fonseca, Serra do Flamengo, Serra de São Miguel e Serra do Papagaio.

### **1.1.1 – Localização e Vias de Acesso**

O maciço cristalino em questão possui orientação preferencial N-S, o que contrasta com a orientação mais comum da maioria das serras do Estado do Ceará, que é de NE – SW. As serras da porção Sul do MCC estão localizadas parcialmente nos territórios dos municípios de Acopiara, Piquet Carneiro, Mombaça, na região Centro-Sul do Estado do Ceará (Figura 1).

A área de estudo dista aproximadamente 340 km da Capital, tendo como acesso duas rotas alternativas. A principal rota pode ser feita pela BR-116, partindo da cidade de Fortaleza até o município de Chorozinho, seguindo posteriormente pela BR-122 até a cidade de Quixadá, e depois pela CE-060, conhecida como Estrada do Algodão passando pelas cidades de Quixadá, Quixeramobim, Minerolândia e Mombaça até Acopiara. A outra rota segue pela BR-020 de Fortaleza até Boa Viagem, onde pega a BR-266, passando pela cidade de Pedra Branca, seguindo até Minerolândia e de lá até Acopiara pela CE-060. As porções Sul e Leste da área de estudo ficam as margens da CE-060, os setores Sul e Oeste da área em questão têm como acesso principal a CE-371 e algumas estradas locais não pavimentadas e trilhas que partem dessa rodovia estadual (Figura 1).

Figura 01 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor.

## 1.2 – Justificativa

A área de estudo encontra-se próximo à Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e de outras zonas de cisalhamento menores, de outras zonas de cisalhamento transcorrente contracional, dextral e sinistral, fato que pode ter condicionado o controle estrutural dessas elevações. A litologia que sustenta as serras é diversificada e composta por rochas resistentes, como por exemplo, os quartzitos, que podem ter contribuído para conservar a altimetria relativamente elevada na região, formando relevos alongados em forma de cristas, principalmente nas serras do Maia e do Flamengo. Nas outras porções do MCC, onde as serras são modeladas em outros tipos de rochas, como gnaisses e migmatitos, as características dessas serras são diferentes das suas vizinhas, apresentando formas mais abauladas e deixando evidente vários caimentos. Prováveis cavalgamentos das camadas rochosas podem sugerir aspecto de relevos do tipo *napper*, a exemplo das serras de São Miguel e Papagaio.

Esta região é geomorfologicamente complexa, apresentando diferentes formas nas vertentes das serras. No entanto essas serras apresentam encostas bastante íngremes com solos rasos e rochosos, o que dificulta o uso e a ocupação do solo das mesmas, onde esse uso se materializa na agricultura de subsistência. Levando-se em conta as limitações tecnológicas, econômicas e sociais da população rural local, o uso dessas vertentes, voltadas para agricultura de subsistência, tem sido marcado por práticas não sustentáveis, como a não reposição da vegetação natural após a utilização da área pelos plantios de grãos.

O uso e ocupação das serras em análise apresentam diferentes tipos de aplicação de uma localidade para outra, a depender mais da topografia do que do tipo de solo. Tal fato é visível em relação à Serra do Fonseca, que apresenta a maior declividade. No segmento Leste da serra ocorrem poucos ravinamentos e grande quantidade de rochas aflorando nas vertentes. Nesse setor, ocorre acentuada degradação ambiental, com desmatamento desordenado para uso de plantios perpendiculares às curvas de nível do terreno. Na porção Oeste desta mesma serra verificou-se o contrário, as ravinas são mais frequentes, com desenvolvimento relevante de festões, onde os afloramentos rochosos são quase inexistentes. Porém, por ser de difícil acesso, acha-se salvaguardada da degradação causada pelas atividades humanas. Assim, as condições naturais, que propiciam maior ou menor intensidade de ação humana, controla também o grau de degradação ambiental.

A apropriação desses relevos está voltada basicamente para agricultura de subsistência ou agricultura familiar, que ainda utiliza técnicas rudimentares, como desmatamento seguido pela queimada da vegetação remanescente para dar lugar ao plantio sazonal, que não consegue proteger o solo da erosão causada pelas precipitações pluviométricas. O tipo de cultura mais comum desenvolvida na região é a classificada como temporária, dentre elas estão o milho, o feijão, a mandioca e o algodão. São cultivadas de forma rudimentar e até indiscriminada, ou seja, sem o preparo adequado da terra, irrigação específica ou tipo de cultivo apropriado para aquele tipo de solo.

A aplicação deste tipo de cultivo, com desmatamentos e queimadas, favorece a perda de nutrientes nas camadas superiores de solo no momento em que as chuvas caem em cultivos no sentido perpendicular as curvas de nível (CLAUDINO-SALES, 1993). Os pequenos agricultores, habitantes desses aglomerados situados nas serras em análise, não possuem máquinas agrícolas e nem equipamentos adequados para exploração de regiões de declividade acentuada, com solos juvenis, de cobertura vegetal frágil e rarefeita, e nas quais ocorre déficit hídrico elevado no segundo semestre do ano. Na maioria dos casos, esses agricultores desconhecem técnicas de plantio, como as de curvas de nível, que reduz as perdas de solo e nutrientes por erosão pluvial.

A pecuária na região também é uma atividade importante para sobrevivência da população local. Para alimentar o gado, é feito o plantio de “pasto”, e isso, em detrimento da vegetação natural, que é desmatada em grande quantidade, tanto em setores de relevos suaves quanto nas partes de declividade mais acentuada das serras. Dessa forma, a natureza do tipo de uso e ocupação do solo, bem como dos diferentes níveis de degradação identificados, tem controle primário definido pelas características geomorfológicas do relevo que caracteriza a área estudada.

### **1.3 – Fundamentação Teórica**

Inicialmente a pesquisa foi fundamentada na utilização de técnicas de Geoprocessamento, com o uso de dados multifonte de sensores remotos e aplicação de técnicas analíticas em ambiente SIG. Por meio das técnicas Sensoriamento Remoto (SR) pôde-se adquirir modelos digitais de elevação (MDE), que serviram como base para geração das variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e

curvatura horizontal) utilizadas para analisar as formas, a dinâmica do relevo e a possibilidade de risco a erosão na área de estudo. O SIG compõe um importante ambiente computacional para auxiliar no melhoramento, armazenamento, processamento, integração e análise dos dados georeferenciados.

O Geoprocessamento é um termo abrangente para tratar das técnicas de análise espacial para dados digitais. Essas técnicas permitem que sejam feitas a captura, a armazenagem e o processamento dos dados, possibilitando o estudo do espaço com maior precisão, diminuindo assim os custos e o tempo da realização de projetos, que demandem a necessidade de integração de dados diversos. Para Câmara e Davis (2001) o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento, que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente em diversas áreas, mas podem ser destacadas a sua maior aplicação nas análises de Recursos Naturais e no Planejamento Urbano e Regional.

O Sensoriamento Remoto (SR) possui uma larga aplicação na análise dos recursos naturais. O conceito de SR foi definido por vários autores e ambos concordam que o princípio básico é detecção de informações sobre um determinado alvo sem que haja contato direto entre sensor e alvo, fato que por si já explica a sua potencialidade de aplicação em diferentes áreas. IBGE (2000) sintetiza a ideia, definindo que o SR consiste na medição ou aquisição de dados sobre um objeto ou cena a distância ou, mais especificamente, obtenção de informações sem entrar em contato direto com a área ou o fenômeno investigado. A aquisição das informações pode ser feita através da interação da radiação eletromagnética com o objeto e a captação dessa interação é feita por meio de sensores, que podem estar a bordo de aeronaves, espaçonaves, satélites ou outras plataformas (NOVO, 2010).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) utilizados como base para várias análises de pesquisa na área da Geociências podem ser gerados a partir de sensores passivos e/ou ativos. Neste trabalho empregaram-se os sensores passivos ASTER, do satélite EOS, em seu modo GDEM e dados oriundos do sensor ativos SAR da missão SRTM. Para o estudo da paisagem, os MDE têm sido usados largamente, principalmente para análise das formas de relevo. Uma das aplicações mais utilizadas são para derivar as variáveis morfométricas, principalmente para declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal. Para Wilson e Gallant (2000) esses dados topográficos possuem relevantes aplicações principalmente na

geomorfologia e hidrologia. Porém alguns estudos obtiveram sucesso sugerindo outras aplicações. Bispo (2007) propôs a utilização do MDE dos dados TOPODATA para fazer mapeamento de vegetação.

A Geomorfometria Moderna consiste em extrair através da topografia digital, parâmetros da superfície da Terra e suas características espaciais (WILSON, 2012). A análise morfométrica tem sido largamente discutida no âmbito de sua eficácia no estudo da Geomorfologia Moderna, que utiliza ferramentas tecnológicas e matemáticas para dar suporte ao estudo das formas de relevo terrestre. A utilização das principais variáveis morfométricas, como: declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e curvatura horizontal; são de grande relevância para o estudo das formas de relevo e de sua evolução.

Logo, o estudo das declividades do terreno permite entender os processos da dinâmica dos materiais que transitam na vertente. Os declives menos acentuados associados aos tipos e texturas dos solos, quantidade de matéria orgânica na superfície, favorecem a infiltração, portanto diminuem o risco de erosão dos solos. Os critérios utilizados para a classificação de declividade no presente trabalho foi o mesmo adotado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPRAPA), que determinou seis classes de declividade, considerando o nível de inclinação do terreno, conforme descrito na Tabela 01.

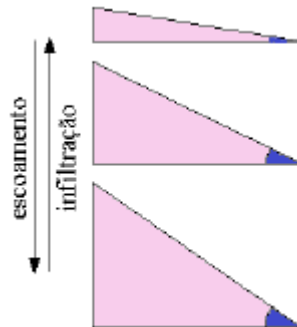
Tabela 01 – Classes de declividades e níveis de inclinação do terreno.

<b>Classe de Declividade</b>	<b>Nível de Inclinação (%)</b>
Plano	0 - 3%
Suave Ondulado	3 - 8%
Ondulado	8 - 20%
Forte Ondulado	20 - 45%
Montanhoso	45 - 75%
Escarpado	+ 75%

Fonte: EMPRAPA (2006).

Dependendo do grau de declividade pode ser possível prever o tipo de erosão e o uso do terreno. A declividade é um fator preponderante para definir se vai haver maior ou menor escoamento e infiltração no terreno, tendo assim uma relação direta entre essas variáveis, ou seja, quanto maior a declividade menor a infiltração e quanto menor a declividade maior a infiltração e vice-versa (Figura 2).

Figura 02 – Esquema da razão entre escoamento, infiltração e nível de declividade do terreno.



Fonte: Valeriano e Albuquerque (2010).

A declividade associada à litologia, tipo de solos, cobertura vegetal, precipitação de chuva e outros fatores morfométricos podem indicar um grau maior ou menor da probabilidade do risco de erosão das vertentes (PRADHAN, 2010). Então, o estudo da declividade é de fundamental importância para análise da geomorfologia, associada à pedologia, a cobertura vegetal e a outros fatores (como o clima e orientação das vertentes), podendo inferir a análise de risco de desmoronamento ou avalanches de terras, e assim auxiliando o planejamento e a prevenção de desastres naturais.

A orientação de vertentes é uma variável importante para entender a direção das linhas de fluxos de água e sedimentos. Através da definição de orientação desses fluxos pode-se prever a direção de deslocamento dos movimentos gravitacionais. De acordo com Oliveira (1984) a orientação das vertentes possui uma correlação com o clima e o grau de isolamento em decorrência da movimentação durante o dia. Diferentes posições de vertentes em determinadas regiões recebem umidade variável, favorecendo a diferenciação do intemperismo, da erosão, dos tipos de solos e da formação vegetal. Tal fato, associado ao grau de inclinação do terreno e à geologia, pode explicar a diferenciação de paisagens que pertencem a mesma formação geomorfológica.

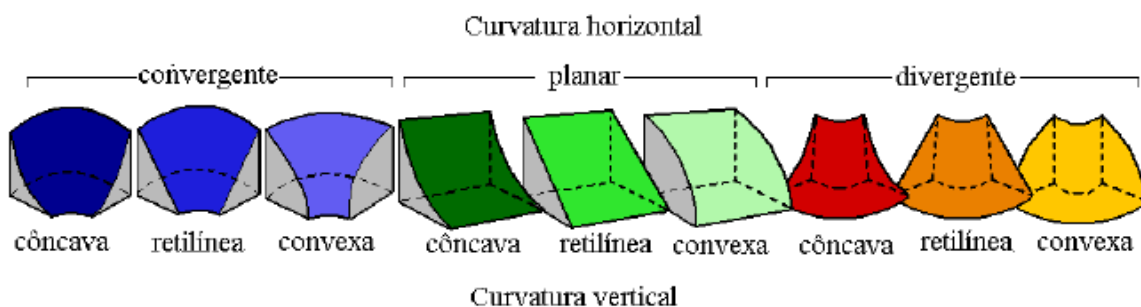
A curvatura horizontal é uma importante variável do escoamento superficial, pois se pode prever a expansão da drenagem e suas possíveis consequências de alagamento. Para Hilberts *et al.* (2004) a curvatura horizontal, quando associada a outras variáveis, como curvatura vertical e declividade, pode exercer um importante controle sobre a vazante dos fluxos superficiais. A curvatura horizontal indica padrões de divergência ou convergência das linhas de fluxos (água, sedimentos, minerais e matéria orgânica). O caráter divergente da



curvatura mostra o alargamento das linhas de fluxo, que podem indicar topografia mais suave ou vales abertos, e o aspecto convergente sugere um estreitamento dos caminhos do escoamento formando vales mais fechados.

O estudo da curvatura vertical refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno quando analisado em perfil (VALERIANO, 2003). A análise dos tipos de curvaturas vertical de vertentes é interessante do ponto de vista morfológico, pedogenético e hidrológico. Através do caráter vertical da curvatura associado à declividade, ao clima e ao substrato do terreno pode-se inferir o tipo de solo a ser formado na encosta, sua possível movimentação por gravidade e prováveis pontos de acumulação. Sua aplicabilidade também é bem sucedida no mapeamento geomorfológico e pedológico. As formas das vertentes também podem ser definidas pela associação dos tipos de curvaturas vertical e horizontal (Figura 3).

Figura 03 – Esquema das formas do a partir da associação dos tipos de curvaturas vertical e horizontal.



Fonte: Valeriano (2008).

A integração dos dados dessas variáveis morfométricas para análise geomorfológica é bem pertinente, podendo ser realizada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), que vem mostrando ser uma ferramenta eficiente para o estudo da paisagem, nesse sentido Lang e Stefan (2009) apresentam diversas possibilidades e técnicas de estudo da paisagem utilizando o SIG como elemento principal de integração e avaliação de dados.

A análise de risco a partir das ferramentas de geoprocessamento é uma realidade nas pesquisas em Geociências, trabalhos publicados nos últimos anos em livros, periódicos, teses e dissertações (BATISTA, 2014; DEMARCHI, 2012; BANDEIRA, 2003; PEREIRA E SILVA, 2007; PFALTZGRAFF, 2007; WEILL, LAMPARELLI, 2001; MASKREY, 1998), mostram uma análise de risco subsidiados por dados produzidos a partir do sensoriamento remoto e analisados em ambiente SIG, utilizando técnicas como a álgebra de mapas para fazer

a modelagem desses dados, com o objetivo de oferecer suporte as previsões dos fenômenos que possa ocorrer na realidade do terreno.

## **1.4 – Objetivos**

### ***Objetivo Geral***

O objetivo principal desta pesquisa é fazer uma análise geomorfológica das serras da porção Sul do MCC, bem como realizar uma avaliação de risco à erosão desse setor através da modelagem do terreno e da análise morfométrica, utilizando para tal Modelos Digitais de Elevação (MDE) e técnicas de geoprocessamento para auxiliar para esta análise.

### ***Objetivos Específicos***

- Realizar uma análise morfométrica para identificar e compreender as formas das vertentes e entender como os processos modeladores que atuaram e ainda atuam no relevo da região;
- Realizar análises com vários MDE para testar as suas aplicabilidades no estudo das formas do terreno;
- Testar a validade dos produtos das variáveis morfométricas geradas a partir do MDE Topodata;
- Fazer uma análise de suscetibilidade de risco a erosão, por meio das técnicas de geoprocessamento;
- Confeccionar documentos cartográficos, incluindo os mapas temáticos dos recursos naturais (geologia, geomorfologia, hidrografia e solos), cartas morfométricas em várias escalas, e cartas de avaliação de risco a erosão.

---

## **CAPITULO 2**

### MATERIAIS E MÉTODOS

---

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração desta Dissertação de Mestrado foram empregados métodos e materiais que permitissem alcançar os objetivos determinados. A metodologia empregada foi baseada na aplicação de três etapas básicas de trabalho, definidas como: Etapa de Pré-Campo, Etapa de Campo e Etapa de Pós-Campo. Para aplicação dessas etapas foram utilizados materiais pertinentes para os estudos feitos e as análises executadas.

### 2.1 – Materiais

#### ***ASTER-GDEM***

Os dados ASTER-GDEM foram obtidos desenvolvidos pela parceria entre *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *Ministry of Economy, Trade, and Industry* (METI) do Japão por meio da aquisição das imagens do sensor ASTER – sensor passivo acoplado ao satélite *Earth Observing System* (EOS), com o intuito de melhorar a resolução espacial e a acurácia dos dados altimétricos. As referidas imagens foram captadas em pares estereoscópicos, cujas cenas são de tamanho 60 x 60 km (TACHIKAWA *et al.*, 2011). Os dados ASTER-GDEM contemplam parte do globo terrestre, entre as latitudes de 83° N e 83° S.

Os produtos GDEM 2 são a versão melhorada em relação ao GDEM 1, onde foi aplicado uma máscara de água para corrigir os erros causados por ruídos nos locais causada pela presença de corpos de água. A imagem GDEM 2 apresenta resolução espacial de 75 m e precisão de 17 m com 95% de confiabilidade, esses dados estão colocados em uma grade de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m na Linha do Equador) (ERSDAC, 2011).

#### ***SRTM***

O Programa *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) foi uma missão realizada pela NASA, em parceria com a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), a Agência Espacial Alemã (DLR) e a Agência Espacial Italiana (ASI), cujo objetivo principal era gerar um modelo de elevação para todo o globo terrestre com alta precisão por meio da obtenção de dados SAR (radar de abertura sintética), que estava a bordo do ônibus espacial Endeavour. Esta missão teve a duração de 11 dias, sendo realizada entre os dias 11 a 22 de fevereiro de 2000 (FARR *et al.*, 2007; FONI e SEAL, 2004).

A partir desses dados coletados foi elaborado o MDE para aproximadamente 80% do globo terrestre, numa área limitada entre as latitudes 60° N e 54° S (PIERCE *et al.*, 2006). Os MDE foram adquiridos por meio da técnica de interferometria, onde os sensores de SAR operavam nas bandas C e X (JAKOB e VAN, 2001).

Após recobrir todo o globo terrestre, os 12 TB de dados obtidos durante a missão foram processados para gerar o MDE com precisão vertical absoluta de  $\pm 16$  m, precisão relativa de  $\pm 10$  m (RABUS *et al.*, 2003) e resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente cerca de 30 m) para os Estados Unidos e 3 arcos-segundo ( $\pm 90$  m) para o restante do mundo.

### ***TOPODATA***

O Projeto TOPODATA foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que visou melhorar a resolução espacial dos dados SRTM da NASA de 3 arcos-segundo para 1 arco-segundo, por meio do método de Krigagem, corrigindo as imperfeições e preenchendo de falhas (VALERIANO e ROSSETTI, 2012). Isso foi possível por meio da aplicação de uma série de processamentos nos dados STRM para minimizar distorções locais e ruídos existentes nos dados brutos da NASA.

O MDE gerado pelos dados TOPODATA, bem como demais produtos derivados (declividade, orientação, curvatura vertical, curvatura horizontal, relevo sombreado e outros) estão estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação de folhas na escala 1:250.000 do Brasil (VALERIANO, 2004).

### ***Outras Ferramentas Utilizadas***

Foram utilizados softwares específicos de Geoprocessamento: ArcGIS® 10.1; Envi® 4.8 e Global Mapper®.

## **2.2 – Levantamentos Cartográfico e Bibliográfico**

Inicialmente foram feitos levantamentos bibliográficos em artigos publicados por diversos periódicos nacionais e internacionais da área de Geociências, livros eletrônicos e impressos, monografias, dissertações, teses de várias universidades brasileiras e relatórios cartas geológicas da CPRM.

A aquisição das bases de dados impressas e digitais, para o mapeamento e as análises preliminares, foram realizadas através de *download* de bancos de dados disponíveis na internet (USGS, INPE, GEOBANK-CPRM, IBGE e EMBRAPA) e aquisição direta com órgãos públicos (IPECE, FUCEME e CPRM). Essa *Geodatabase* inclui cartas e mapas prontos, bases digitais vetoriais, *raster* em diversos formatos e produtos de sensores ópticos (imagens multiespectrais) e de radar (modelos digitais de elevação).

Os dados da topografia digital utilizada no trabalho foram adquiridos gratuitamente, por meio de *download*, na rede mundial de computadores, as imagens SRTM e ASTER-GDEM, estão disponíveis pelo *site* da *United States Geological Survey* (USGS) em <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> e o Projeto TOPODATA em <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>.

## **2.3 – Etapa de Campo**

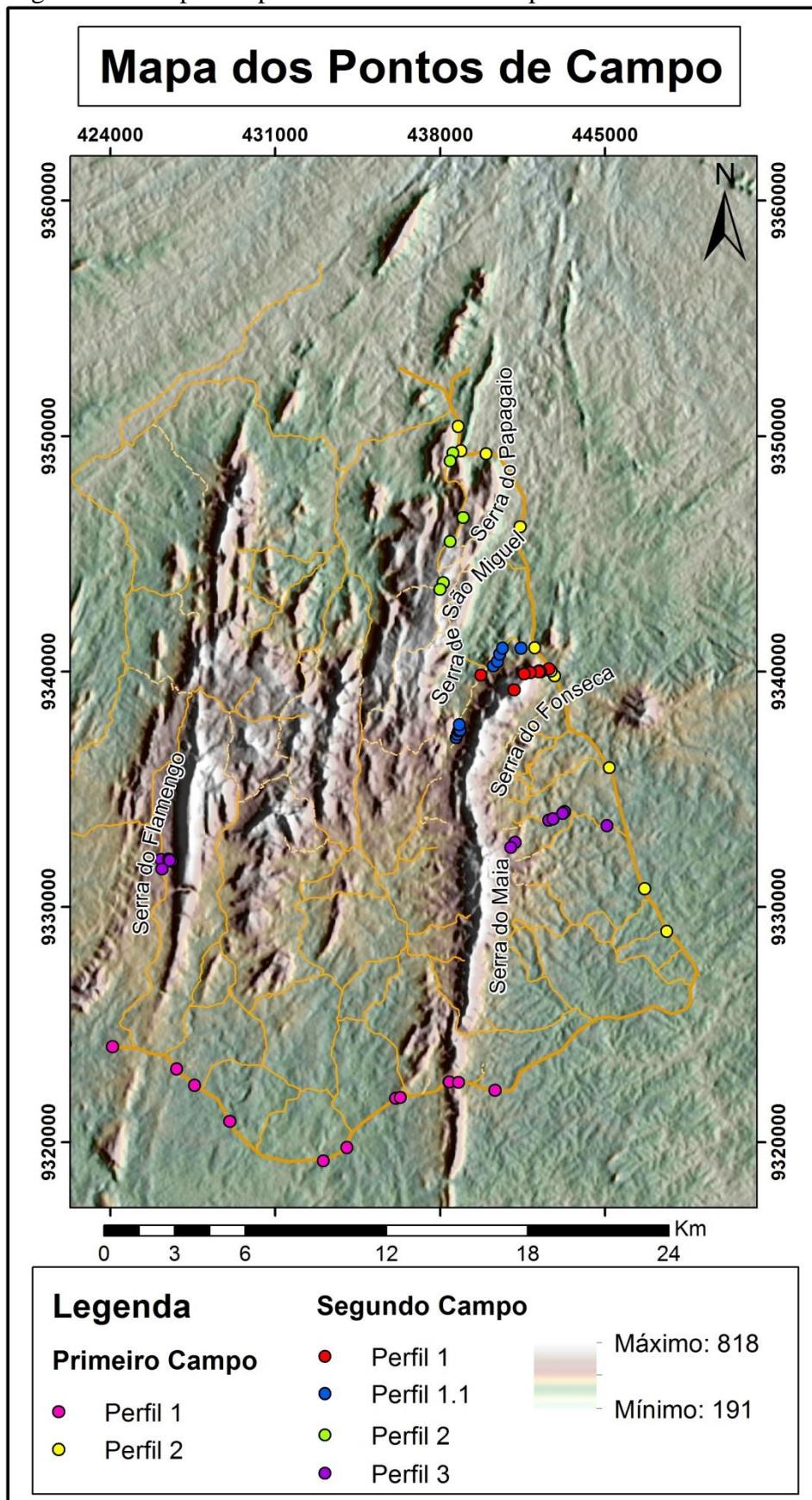
Os trabalhos de campo tiveram como objetivo principal fazer um levantamento preliminar da área de estudo e a validação da morfologia do terreno apresentados nos mapas das variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e curvatura horizontal). Esses campos foram norteados por perfis, onde se pôde fazer a marcação de pontos específicos (Figura 4) para realizar medidas estruturais em afloramentos rochosos e registros fotográficos da paisagem.

### **2.3.1 – Primeiro Levantamento de Campo**

Nesse campo foram feitos reconhecimentos de vários afloramentos rochosos ao longo de duas estradas, onde foram tiradas medidas e feita identificação da litologia, das estruturas regionais associadas as deformações locais e suas cinemáticas.

Tomando como base o mapa geológico da CPRM (2003) e a rede de estradas e trilhas da região foram traçados perfis para nortear o reconhecimento das principais feições geológicas e geomorfológicas da região. Esses perfis foram traçados a partir da cidade de Acopiara seguindo pela CE-371 (perfil 1) e pela CE-060 (perfil 2).

Figura 04 – Mapa dos pontos visitados em campo.



Fonte: Autor.

No perfil 1 foram visitados onze afloramentos e no perfil 2 (Figura 4), oito afloramentos, em cada parada foram tiradas as medidas de *Dip* e *Strike* com uma bússola do tipo Brunton, também foram marcados com GPS de bolso as cotas altimétricas de cada ponto para comparação com as cotas indicadas pelas MDE. Foram realizadas a identificação de litotipos e contatos litológicos, reconhecimento estrutural, identificação de zonas de cisalhamento, falhas, fraturas, dobras e suas cinemáticas, reconhecimentos das principais formas de relevo próximos aos pontos de coleta de dados, foram feitos também registros fotográficos em todos os pontos.

### 2.3.2 – Segundo Levantamento de Campo

A realização desse campo teve como objetivo fazer um levantamento das informações da morfologia do terreno e de seus processos associados para validar os mapas das variáveis morfométricas gerados a partir do MDE Topodata. Esse campo consistiu em percorrer a área estudada, pelas estradas e trilhas, realizando perfis topográficos para marcação de pontos de observação que pudessem ser usados como identificação das feições morfométricas. Todas as ocorrências foram registradas através de fotografias tiradas de uma câmera digital, e foram georreferenciados por GPS de navegação, configurado no Sistema de Coordenadas UTM e *Datum* WGS-84.

Foram traçados Quatro grandes perfis cortando o maior número possível das feições geomorfológicas. O perfil 1 foi traçado na Serra do Fonseca (Figura 4), esse perfil foi visitado por meio de trilhas que vai do sopé até o topo, durante o percurso, foram feitos registros fotográficos de todos os pontos, onde foi possível, registrar as feições principais das encostas, também foram tiradas medidas estruturais dos pontos que haviam afloramentos rochosos. O perfil 1.1 foi traçado ao longo do vale que separa as serras do Fonseca e São Miguel (Figura 4), esse perfil teve como objetivo fazer uma avaliação do setor Oeste da Serra do Fonseca, também foram feitos registros fotográficos e tiradas medidas estruturais de afloramentos dos pontos visitados.

O perfil 2 foi realizado nas serras de São Miguel e Papagaio (Figura 4), aqui foram visitados seis pontos específicos do sopé da Serra do Papagaio até o topo da Serra de São Miguel, de onde se pôde ter uma visão panorâmica de grande parte da área de estudo. Assim como nos outros perfis também foram feitas medidas de afloramentos e registros fotográficos. No Perfil 3 foi plotado na parte Leste da Serra do Maia e a Oeste da Serra do Flamengo



(Figura 4). Para esse perfil foram realizados mesmos procedimentos aplicados nos perfis anteriores

## **2.4 – Etapa de Laboratório**

### **2.4.1 – Geoprocessamento**

A etapa de Geoprocessamentos dos dados se deu em duas etapas: pré-processamento, onde foram feitos os ajustes necessários e correção de erros das bases cartográficas digitais, preparando-as para a fase de processamento desses dados com maior segurança e confiabilidade nos produtos derivados, que serviram de ferramenta de análise da pesquisa.

#### ***Pré-Processamento***

Algumas bases precisaram de correções preliminares, os as bases vetoriais da CPRM, IPECE e FUCEME, tiveram que ser reprojetados de coordenadas geográficas e *Datum* SAD 69 para UTM e WGS 84, essa operação foi realizada no ArcGIS® 10.1. As bases matriciais também precisaram de ajustes, pois as cenas que foram adquiridas necessitaram ser mosaicadas e recortadas de acordo com o tamanho estabelecido para área, esse processo foi realizado no ENVI® 4.8.

O MDE Topodata é obtido por meio de *download* no portal do INPE, no entanto o MDE que cobre a área de estudo veio sem referência espacial, para resolver essa questão o arquivo matricial desse MDE foi projetado inicialmente para coordenadas geográficas e WGS 84 a fim de que estejam no mesmo sistema de projeção das imagens Aster-GDEM e SRTM. No entanto o MDE SRTM apresenta muitas falhas de *pixels* sem informações, nesse caso foi aplicado um tratamento através da ferramenta *Fill (Spatial Analyst do ArcGIS®)* para preencher essas células sem valores. Ao final desse processo todos os MDE foram replicados e reprojetados para o sistema UTM.

#### ***Processamento dos Dados e Confeção de Mapas***

As variáveis morfométricas foram geradas a partir dos MDE Aster-GDEM, SRTM e Topodata, em dois sistemas de coordenadas diferentes. Para gerar a declividade e orientação de vertentes se utilizou as imagens em coordenadas geográficas e curvaturas verticais e

horizontais em UTM. Todas as variáveis foram geradas no *software* ArcGIS®, utilizando as ferramentas *3D Analyst* e *spatial analysis*.

#### **2.4.2 – Derivação das variáveis morfométricas**

##### ***Declividade***

O cálculo da declividade (D) em porcentagem foi feito pela ferramenta *slope* usando como base o algoritmo:

$$D = (dV/dH) * 100$$

A expressão corresponde a razão de dV (distância vertical) e dH (distância horizontal), multiplicado por 100 para dar o valor em percentual. Para definir os níveis de declividade foram escolhidas seis classes definidas pela EMBRAPA (2006) para reclassificação das imagens geradas (Tabela 1).

##### ***Orientação de Vertentes***

A orientação de vertentes (OV) foi obtida a partir da ferramenta *aspect* que usa janelas moveis 3x3, utilizando um algoritmo que agrupa os valores das oito células vizinhas, onde para cada célula no centro da janela é calculada um valor considerando os valores adjacentes. Tomando como base a taxa de mudança de direção de X e Y para cada célula a orientação de vertentes foi calculado usando a Fórmula:

$$OV = 57,29578 * \text{atan2} ([dz/dy], - [dz/dx])$$

Posteriormente, o resultado dessa operação é então convertido em valores de direção da bússola (0-360 graus).

##### ***Curvaturas Vertical e Horizontal***

As curvaturas vertical e horizontal (Z) são obtidas a partir da ferramenta *curvature* que utiliza janelas moveis 3x3 para calcular as curvaturas aplicando a adaptação de um polinômio quadrático para cada célula (FENG e BAJCSY, 2005; MOORE GRAYSON, LADSON, 1991), como mostra a expressão matemática abaixo:

$$Z = Ax^2y^2+Bx^2y+Cxy^2+Dx^2+Ey^2+Fxy+Gx+Hy+I$$

Durante a manipulação dos dados percebeu-se que a declividade e a orientação apresentaram melhores resultados a partir do cálculo do MDE com projeção UTM, pois como os valores são tratados na unidade métrica possibilitou que os resultados apresentados fossem bem mais delimitados na comparação com os dados na projeção geográfica. As derivadas das curvaturas verticais e horizontais mostraram resultados significativos apenas nas operações realizadas a partir dos arquivos com coordenadas Geográficas. Todas as operações foram feitas igualmente para todas as imagens, ASTER GDEM, SRTM e TOPODATA, para que não houvesse dúvida quanto aos resultados obtidos e também para que fosse permitido fazer uma análise comparativa quanto ao desempenho e a melhor aplicação dos produtos gerados.

Os mapas temáticos foram confeccionados a partir de bases prontas, porém algumas necessitaram de ajustes significativos para atualização de dados. Principalmente as bases de solo que tiveram toda a nomenclatura transcrita para a atual denominação das classes de solos, proposta por Embrapa (2006). As bases de geologia precisaram de mudanças, esses ajustes foram realizados na denominação de várias unidades litoestratigráficas levando em consideração as denominações adotadas em quatro cartas de mapeamento geológico do Ceará feitos pela CPRM.

Para fazer essas mudanças foram empregadas bases oficiais, como o livro Sistema Brasileiros de Classificação de Solos publicado pela Embrapa em 2006 para o mapeamento de solos. E para os mapas relacionados a geologia se usou como alicerce os mapas e cartas produzidas pela CPRM, carta Jaguaribe-SW (SB. 24-Y) na escala de 1:500.000 de 2000, carta a milionésima Jaguaribe (SB.24) de 2004, carta Iguatu (SB. 24-Y-B) na escala de 1:250.000 de 1997 e o mapeamento geológico do Ceará de 2003 na escala de 1:500.000.

#### **2.4.3 – Mapas de Avaliação de Risco a Erosão.**

Para a confecção dos mapas de avaliação dos riscos à erosão foi feita uma operação de álgebra de mapa utilizando a ferramenta *spatial analysis* do *software* ArcGIS® esse cálculo foi realizado com base nas quatro variáveis morfométricas (declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e orientação de vertentes), na geologia, na densidade de lineamentos, nos tipos de vegetação, nas classes de solos, na hipsometria e nos cobertura e uso da Terra (água,

vegetação fechada, vegetação aberta, áreas de cultivos e solos exposto), todos esses atributos estavam dispostos em arquivos de formato *raster*.

Antes da realização das operações de álgebra de mapas todos os pesos das variáveis precisaram ser ponderados de acordo com a probabilidade dos atributos dessas variáveis causarem um maior ou menor nível de erosão do terreno, essas ponderações dos pesos foram feitas através da ferramenta *spatial analysis* do ArcGIS®. Depois que os pesos de todos os arquivos *raster* das variáveis foram ponderados, pôde-se então fazer as operações de álgebra de mapas utilizando para isso a fórmula abaixo:

$$\text{Risco} = (\text{variável 1} * \text{influencia\%}) + (\text{variável 2} * \text{influencia\%}) + (\text{variável 3} * \text{influencia\%}) + (\text{variável 1} * \text{influencia\%})...$$

O resultado do cálculo da operação de álgebra de mapas foi um único arquivo *raster* de saída para cada operação realizada para gerar as cartas de risco, ou seja, cada carta correspondeu a um arquivo diferente, onde foi permitido que essas cartas apresentassem as possíveis áreas de risco do terreno. Posteriormente esses produtos foram classificados em graus de risco, muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

---

## **CAPITULO 3**

### **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDOS**

---

### **3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDOS**

A área de estudo possui características físicas diversificadas, principalmente na geologia e na geomorfologia local, os solos a vegetação e a hidrografia estão diretamente ligados a essa diversidade, sendo influenciado diretamente por elas. A apresentação desses atributos físicos de forma integrada e simplificada vai ajudar a entender e interpretar a dinâmica natural dessa região serrana.

#### **3.1 – Geologia Regional**

##### **3.1.1 – Província Borborema**

O Ceará possui uma geologia bem diversificada, composta por rochas e estruturas formadas em vários eventos geológicos diferentes. A maior parte dessa geologia está dentro do contexto da Província Borborema. Essa Província é composta por domínios e terrenos distintos separados por lineamentos importantes. A Borborema é o produto geológico de intensa aglutinação de diversos terrenos alóctones, cada um com características e evolução geológica específicas, representando verdadeiras micro-placas continentais, onde estão registrados ciclos orogênicos pretéritos (GOMES e VASCONCELOS, 2000).

De acordo com Mabessone (2002) a Província Borborema foi formada durante o Arqueano e o Paleoproterozóico, há aproximadamente (2,38 a 1,98 Ga), o crescimento crustal juntou os vários domínios geológicos existentes hoje dentro dos limites dessa Província Geológica. A aglutinação final desses terrenos ocorreu por volta de (0,64 a 0,57 Ga) (FERREIRA e SANTOS, 2000) no desenrolar da Orogênese Brasileira/Pan-Africana.

Os autores que discutem a Província Borborema divergem em alguns pontos quanto as denominações dos domínios, terrenos, faixa e principalmente no que se refere aos limites estruturais de alguns domínios a exemplo dos Domínios Ceará Central e Rio Grande do Norte. Fetter *et al.* (2000) consideram que o limite dos dois blocos é a Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu (ZCSP). Delgado *et al.* (2003) entendem que a Zona Cisalhamento Orós (ZCO) e a Zona de Cisalhamento de Aiuaba (ZCA) é o divisor desses domínios. No entanto Cavalcante (1999) diz que a ZCO e a ZCA são os divisores do Domínio Ceará Central e Domínio Jaguaribeano. Arthaud (2007) corrobora da mesma ideia quanto aos limites, porém denomina o Domínio limitante como Orós-Jaguaribe.

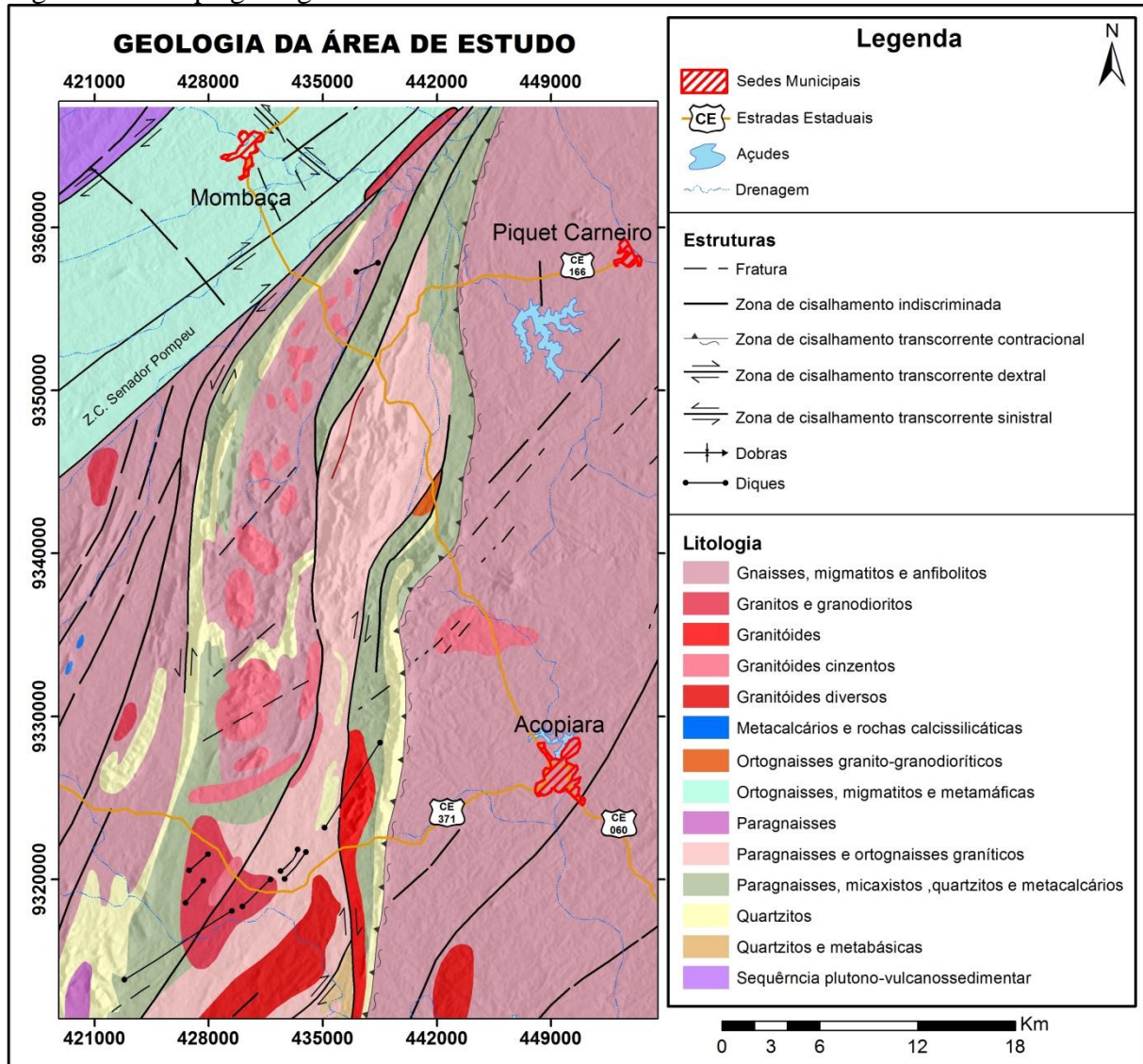
Essa discussão quanto aos limites dos Domínios geológicos poderia ser irrelevante caso a área de estudo não estivesse localizada na faixa entre a Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu e Orós Aiuaba. Considerando a ZCSP como divisor então a maior parte da região estaria dentro do Domínio Rio Grande do Norte, porém se considerar a ZC de Orós e Aiuaba como limite o recorte de estudo estaria totalmente no Domínio Ceará Central.

O Domínio Ceará Central tem como limite o lineamento Brasileiro (Sobral Pedro II) e a Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu (CAVALCANTE *et al.*, 2003). Esse Domínio é resultado de uma longa e complexa história geológica, iniciada no arqueano, a partir de então vários episódios de acreção crustal e diversos ciclos orogênicos deixaram seus registros magmáticos, metamórficos e deformacionais (ALMEIDA, PARENTE, ARTHAUD, 2007).

O Domínio Rio Grande do Norte inclui a faixa de dobramentos Jaguaribeana, Maciço Rio Piranhas, faixa de dobramentos Seridó e seu embasamento Maciço São José do Campestre. Está limitado pelo Lineamento Senador Pompeu a Oeste e pelo Lineamento Patos a Sul. Esse Domínio apresenta evidências da atuação do orógeno Transamazônico com a ocorrência local de núcleos arqueanos. Sobre o embasamento Transamazônico são encontrados sequências vulcanossedimentares Paleoproterozóicas e metassedimentos Neoproterozóicos (SILVA FILHO *et al.*, 2007).

Diante das muitas informações de diferentes autores, montar o quadro litoestratigráfico regional da área de estudo se tornou complicado, para solucionar essa problemática decidiu-se para esse trabalho seguir a proposta do arcabouço litoestratigráficos apresentado pelo relatório da Carta Jaguaribe-SW (SB. 24-Y) na escala de 1:500.000 de 2000, mesclando com a litoestratigrafia e nomenclatura das unidades geológicas mostradas na carta ao milionésimo Jaguaribe (SB.24) de 2004, no PLGB da carta Iguatu (SB. 24-Y-B) na escala de 1:250.000 de 1997 e no mapeamento do Ceará na escala de 1:500.000 realizado pela CPRM em 2003 (Figura 5).

Figura 05 – Mapa geológico da área de estudos.



Fonte: Cavalcante *et al.*, 2003 e Angelim, *et al.*, 2004.

### 3.1.2 – Complexo Cruzeta

#### *Arqueano*

Unidade Mombaça: Essa unidade ocorre na região noroeste da área de estudos, fazendo limites com a Unidade Acopiara através da zona de cisalhamento de Senador Pompeu. A litologia é composta por ortognaisses cinzentos a biotita e hornblenda, de composição granítica a diorítica, em partes migmatizados, com *sheets* de leucogranitóides e metapegmatóides, corpos lenticulares de anfibolitos, calcissilicáticas, talcoxistos e metaultramáficas (GOMES, VASCONCELOS, TORRES, 2000). Está modelado sobre essas



rochas um relevo relativamente plano sem grande expressão geomorfológica, salvo alguns serrotes isolados.

Unidade Pedra Branca: Ocupa uma pequena parte da região de estudo ficando restrito ao extremo noroeste, localizando-se após a Unidade Mombaça. Essa unidade é dominada por ortognaisses cinzentos, paragnaisses e migmatitos, lentes de anfibolitos/metabasaltos, metagabros, metaultramáficas, metacalcários, micaxistos, gonditos, formações ferríferas/itabiritos e rochas calcissilicáticas (CAVALCANTE *et al.*, 2003).

### **3.1.3 – Complexo Ceará**

#### ***Arqueano***

Complexo Tonalítico-Granodiorítico: A composição litológica é dada por uma complexa associação ortoderivada, gnáissico-migmatítica, associada a corpos de anfibolitos, metacalcários, charnoquito e metaultramáficas, além de corpos tabulares de leucogranitóides e metapegmatóides de diferentes idades. Os litotipos exibem um padrão deformacional complexo, reconhecidamente polifásico, típico de terrenos arqueanos (GOMES *et al.*, 2000). Podendo ser correlata às associações das Unidades Mombaça e Pedra Branca do Complexo Cruzeta. De modo geral as rochas desse complexo não sustentem relevos de grande porte, tendo como característica uma geomorfologia plana a suavemente ondulada, salvo as exceções representadas pelas serras de São Miguel e serra do Papagaio. Essas serras apresentam formas diferentes das suas vizinhas, serra do Flamengo e Maia.

#### ***Paleoproterozóico***

Unidade Acopiara: No recorte da pesquisa a Unidade Acopiara apresenta em grande parte cortada por intrusões graníticas de tamanhos variados, principalmente no setor leste, essa unidade também é marcada por algumas zonas de cisalhamentos dúcteis. Suas associações litológicas são essencialmente metamórficas como paragnaisses, com ou sem granada e/ou silimanita e biotita ortognaisses graníticos, granodioríticos e tonalíticos, em parte, migmatíticos, lentes de quartzitos micaxistos feldspáticos, anfibolitos, metacalcários e calcissilicáticas podendo apresentar a presença subordinada de lentes de metabasitos (GOMES, VASCONCELOS, TORRES, 2000).

## ***Mesoproterozóico***

Unidade Arneiroz: Essa unidade ocorre na área de estudos em duas faixas alongadas que percorre toda a região central cortando a unidade Acopiara de norte a sul, sendo limitada pela zona de cisalhamento de Senador Pompeu. A unidade é constituída por associação de quartzitos, micaxistos e metavulcânicas básicas, em níveis distintos de deformação milonítica (CAVALCANTE *et al.*, 2003). Na outra faixa predominam os paragneisses, os biotitas gnaisses e gnaisses a duas micas com ou sem granada, silimanitas, cianitas e turmalina (VASCONCELOS, PRADO, GOMES 1997). A maioria dos autores consideram que a unidade Arneiroz é formada por uma típica sequência depositada em ambiente marinho plataformal. As serras do Flamengo e Maia são sustentadas por uma associação de micaxisto e quartzitos fato que poderia explicar as suas formas alongadas desenhando na paisagem local duas cristas alinhadas bordejadas por pequenos serrotes de geometrias diversas.

### **3.1.4 – Magmatitos Neoproterozóicos**

#### ***Proterozóico***

Granitóides Cedo a Sin-Tectônicos: Esses tipos granitoides aparecem na área de formas um pouco alongadas, ocorrem encravados em rochas do embasamento próximos a zonas de cisalhamento seguindo paralelamente aos *trends* dessas estruturas. Apresentam características de magmatismo calcialcalino a alcalino, englobando tipos essencialmente plutônicos. Suas litologias compreendem granitos, granodioritos, monzonitos e sienitos de granulação média a grossa, porfiróides, com fácies deformadas, e hornblenda-biotita granodioritos, hornblenda-biotita granitos, porfiríticos, com megacristais de feldspatos. As idades dessas feições estão estimadas em cerca de 650 Ma (GOMES, VASCONCELOS, TORRES, 2000).

Granitóides Tardi a Pós-tectônicos: Apresentam-se em corpos intrusivos relativamente pequenos, aparecem abundantemente em todo setor centro-oeste da região de estudo, entre as serras do Flamengo Maia e São Miguel, alinhados paralelamente a duas zonas de cisalhamento. Essas intrusões possuem formas alongadas, arredondas e ovalada, seus litotipos são biotita granito, quartzo monzodiorito a monzodiorito de coloração cinza-clara, granulação fina a média, isotrópicos a incipientemente orientados, com idades entre 570 e 620 Ma (GOME, VASCONCELOS, TORRES, 2000).

Granitóides Pós-Tectônicos: Ocorrem na porção sul da área de estudo em apenas um corpo de formato alongado de idade aferida entre 520 a 550 Ma, cuja tipologia não foi totalmente discriminada, podendo ser granitos e granodioritos leucocráticos, granitos, monzonitos, granodioritos (GOMES, VASCONCELOS, TORRES, 2000).

### **3.2 – Geomorfologia**

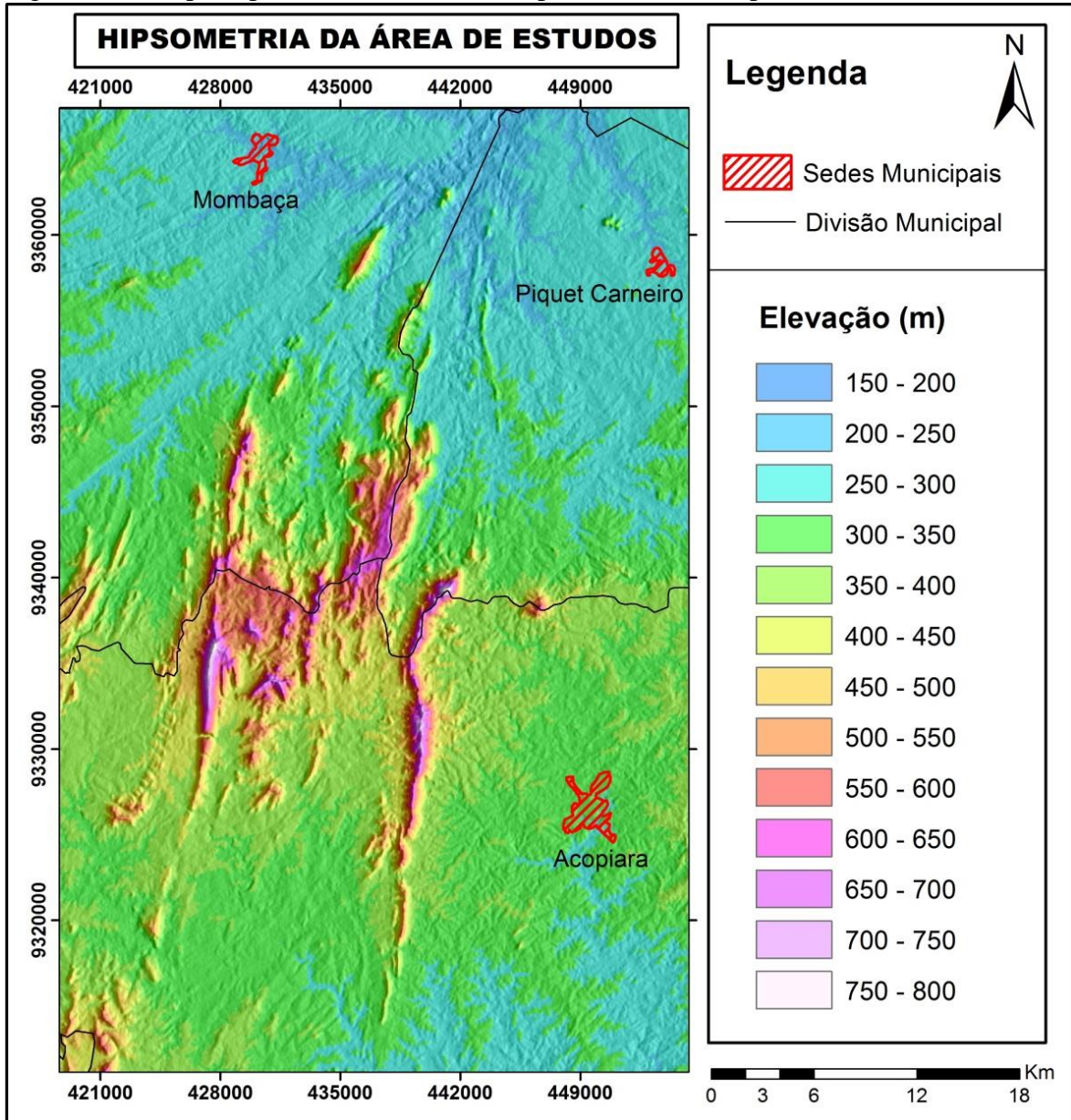
A área da pesquisa é predominantemente serrana, composta por cristas alongadas com topos sustentados por quartzitos, serras com vertentes íngremes em formas de terraços sobrepostos dando um aspecto abaulado, por serrotes com formas suavemente arredondas, serrotes alongados e serrotes em formato de ferradura, toda área das serras é recortada por vales profundos. Sua transição com a Depressão Sertaneja é dada por pequenos morros ligeiramente arredondados.

A topografia na região é um pouco elevada, variando em torno de 200 m na Depressão Periférica a pouco mais de 800 m nos picos do maciço (Figura 6). No geral todas as serras apresentam vertentes bastante íngremes com solos rasos e rochosos. Porém em alguns setores, principalmente ao Norte das serras do Fonseca e do Flamengo, os desníveis do terreno são ainda mais acentuados.

As principais serras estão dispostas em sentido N-S formando espigões elevados em forma de cristas, a exemplo da serra do Flamengo, do Maia e do Fonseca. Entretanto, a serra de São Miguel apresenta aspecto mais abaulado, diferenciando-se das demais serras existentes na área pesquisada. A área serrana encontra-se toda recortada por vales profundos que chegam quase ao nível da depressão periférica.

A serra do Fonseca apresenta grandes declividades, poucos ravinamentos e uma grande quantidade de rochas aflorando em sua vertente na porção Leste. Na porção Oeste verifica-se o contrário: as ravinas são mais frequentes, com um desenvolvimento relevante de festões com solos mais profundos e afloramentos rochosos quase inexistentes. Nos pontos mais elevados da serra é bem comum a ocorrência temporária de olhos d'água como são chamados os pontos de umidade onde a vegetação se mantém verde durante todo ano.

Figura 06 – Mapa Hipsométrico, elaborado a partir do MDE Topodata.



Fonte: Autor, elaborado a partir do MDE do Topodata.

A Serra do Maia, apesar de fazer parte da mesma formação geomorfológica da Serra do Fonseca, teoricamente sofre os mesmos processos de esculturação do relevo, porém apresenta características morfológicas diferentes. A sua vertente Leste, ao contrário do que ocorre na Serra do Fonseca, está bem preservada. Essa serra apresenta em sua totalidade declive mais suave e um festonamento razoavelmente desenvolvido. A Serra do Flamengo possui um formato peculiar em relação às outras serras adjacentes, seu topo é ligeiramente aplainado, ao Sul esse relevo é recortado transversalmente por um vale profundo que chega ao nível da depressão periférica. Esse vale foi escavado pelo riacho Sabonete. Suas vertentes são íngremes com altitudes consideráveis em entre 600 a 800 m.

A Serra de São Miguel é separada da Serra do Fonseca por um vale profundo “cavado” provavelmente por um rio, que deveria cortar as duas serras com uma competência maior que a de hoje, se aproveitando provavelmente de uma falha já existente. As suas vertentes possuíam declives extremamente acentuados e formas abauladas, formadas por terraços sobrepostos um ao outro, onde as rochas expostas mostraram aspectos ruiformes. O platô é relativamente largo com desenvolvimento de pequenos vales alçados.

A Depressão Sertaneja não ultrapassa os 400 m de elevação, sendo formada em sua maioria por rochas metamórficas erodidas. Na zona de transição com as serras as feições geomorfológicas são bem movimentadas com formas colinares, assemelhadas a mares de morros e nos setores próximos aos riachos as formas de relevo são levemente aplainadas.

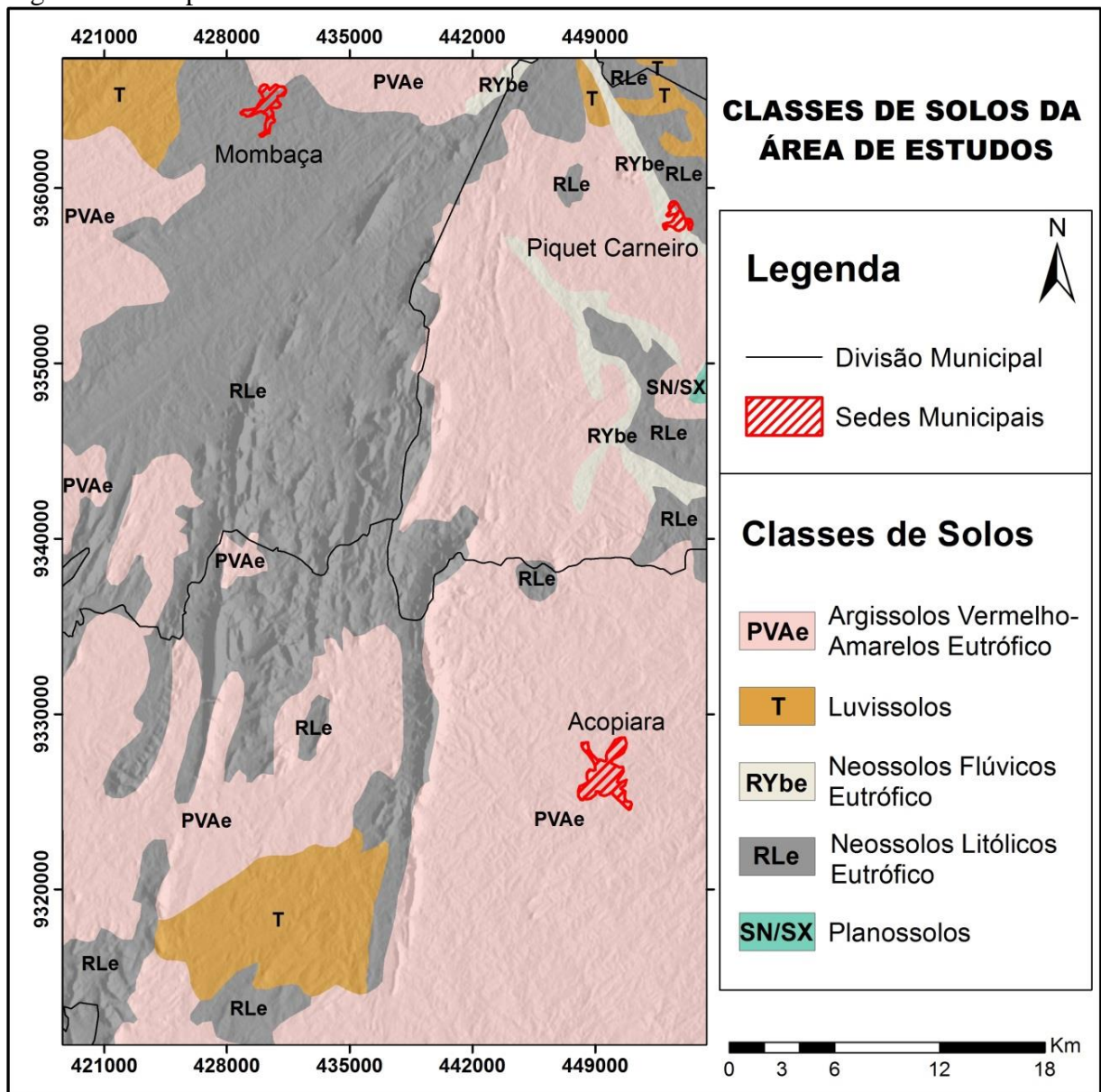
### **3.3 – Solo e Cobertura Vegetal**

Os solos mais abundantes na área de estudo são os Argissolos e os Neossolos, no entanto há outros tipos de solos que ocupam menores dimensões como Luvisolos e Planossolos (Figura 7). Esses tipos principais seguem o princípio dos fatores formadores dos solos que são as condições climáticas, o relevo, o material de origem, entre outros.

Os Neossolos Litólicos Eutróficos são os mais comuns nas vertentes das serras secas em virtude da declividade e da pouca atuação do intemperismo químico, que dificultam a pedogênese. Formados nessas condições, esses solos são bem rasos e com presença de afloramentos e fragmentos de rochas, e sua suscetibilidade erosiva é bastante elevada, sendo totalmente inadequados ao uso agrícola (PERREIRA e SILVA, 2005).

Nas adjacências das serras na Depressão Sertaneja, os solos são mais profundos e argilosos, sendo denominados Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos. Esses solos são quimicamente ácidos podendo ter baixa ou alta fertilidade natural. No caso da área de estudo esses solos apresentam uma boa fertilidade, por estarem em regiões próximas a maciços cristalinos.

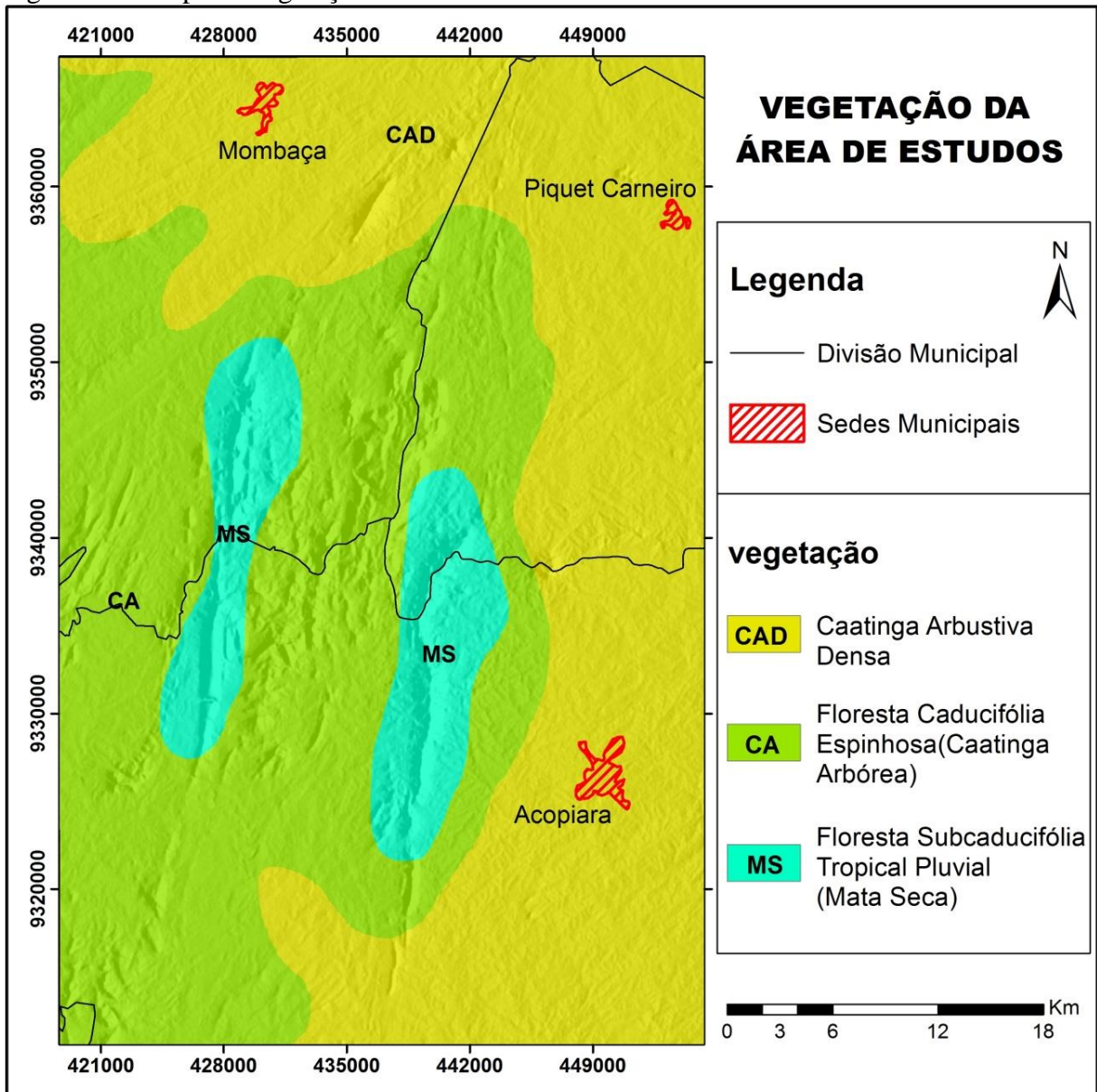
Figura 07 – Mapa de solos da área de estudos.



Fonte: MA/SUDENE, 1973. (Copilado por FUNCEME [200-?]).

O tipo de solo, o relevo e o clima influenciam diretamente no tipo de vegetação natural de uma determinada área. No setor estudado estes elementos da paisagem têm ligação direta com a vegetação natural, que se mostra de forma mais densa nos setores com maiores altitudes e aberta nos locais com topografia menos acentuada. No período seco as folhas secam e caem deixando a vegetação com aspecto cinzento e no período chuvoso as folhas nascem mostrando toda sua essência florística.

Figura 08 – Mapa de vegetação da área de estudos.



Fonte: FUNCEME, 1994.

Na porção serrana da área de estudos, por receber mais umidade principalmente nos setores próximos ao topo, a vegetação é mais densa caracterizando a Mata Seca – Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial de porte arbóreo com as espécies de Pau d’arco, Angico, Pitombeira entre outras como a Palmeira Coco Catolé (*Syagrus oleracea*) (Figura 8). No sopé, a vegetação ainda apresenta um porte arbóreo, porém menos exuberante com espécies espinhosas típico de Caatinga Arbórea – Floresta Caducifolia Espinhosa. A Depressão Periférica, no entanto apresenta espécies típicas da Caatinga Arbustiva.

### 3.4 – Fatores climáticos e Hidrografia

A área estudada está dentro da faixa que compreende o clima tropical-equatorial com sete a oito meses secos, também classificado como semi-árido (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007). A região sofre influência de vários sistemas atmosféricos, dentre eles dois mais importantes Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), causadora dos maiores volumes de chuvas principalmente em março e abril, e Vórtice Ciclônicos de Altos Níveis que atuam de janeiro a fevereiro e as Ondas de Leste, quando se apresentam de forma intensificada pode atingir a região central do Ceará nos meses de Julho a Agosto (FERREIRA e MELLO, 2005), ocasionando chuvas na área de estudo.

A temperatura média no Ceará fica entre 22 a 26° C nas regiões serranas que é o caso da área em questão e acima de 26° C nos Sertão e Litoral, no entanto, essas temperaturas podem apresentar valores inferiores a 22° C nas zonas mais elevadas do maciço de Baturité e planalto da Ibiapaba. (ZANELLA, 2005).

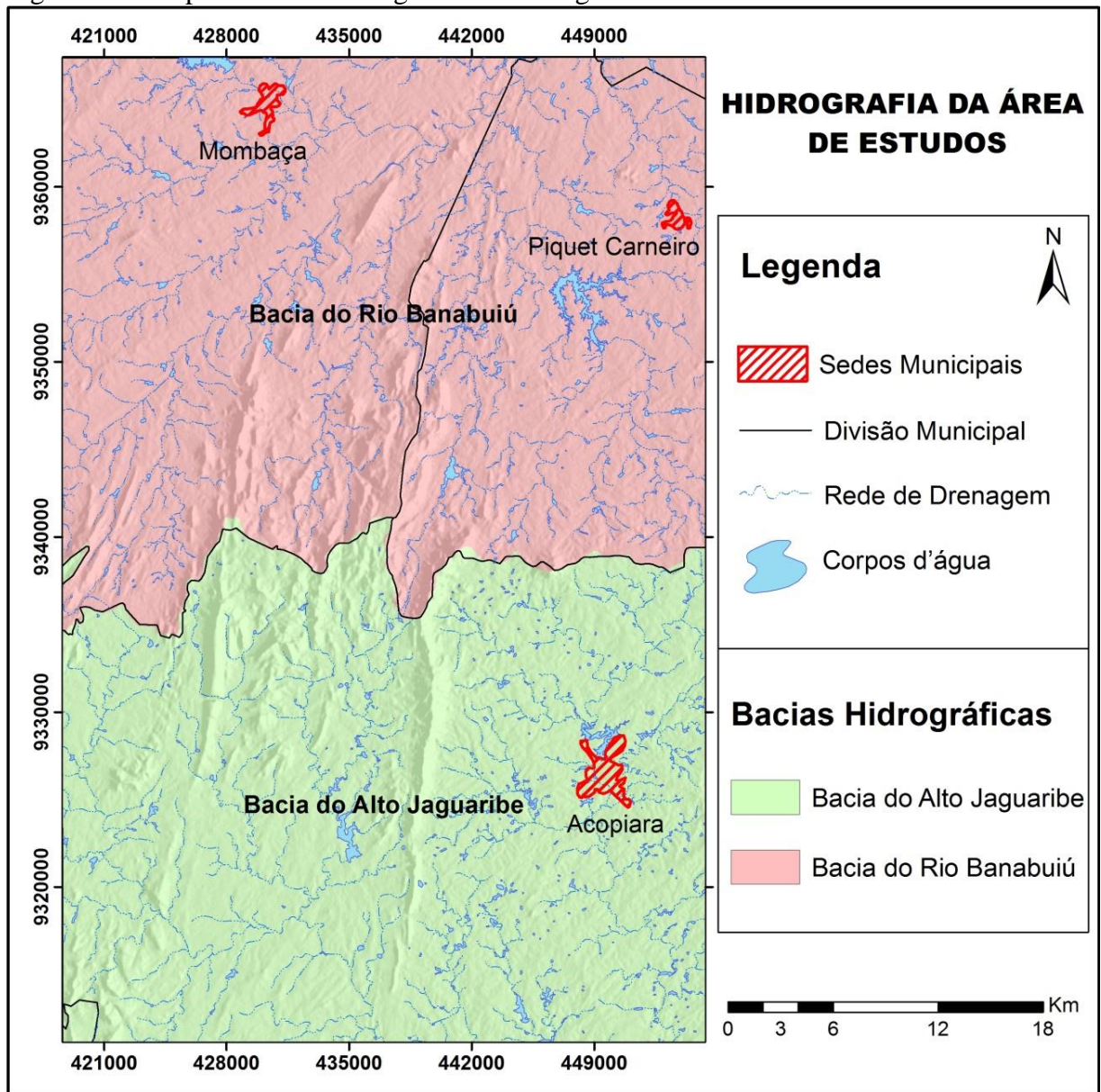
A precipitação pluviométrica anual varia de um ano para o outro, oscilando entre 400 a 900 mm, concentrados em quatro meses, normalmente entre fevereiro e junho, entretanto, é bem comum caírem as primeiras chuvas nos meses de dezembro e janeiro, denominada de pré-estação chuvosa. Em função da irregularidade das chuvas e das elevadas taxas de evapotranspiração, o solo e a vegetação ficam muito secos, ou seja, apresentando déficit hídrico que refletem, essas condições irão refletir diretamente na vazão dos rios e riachos que drenam a o local. O outro fator preponderante para contribuir com essas condições de falta de água durante a maior parte do ano está condicionado a estrutura pouco porosa típica de terrenos cristalinos.

A região é drenada por vários pequenos riachos, que possuem vazão de água apenas no período chuvoso. A área também é divisora de águas das bacias dos rios Jaguaribe e Banabuiú. As serras do Fonseca e São Miguel que ficam localizadas no município de Piquet Carneiro abrigam nascentes de afluentes do rio Banabuiú já as serras do Maia e Flamengo situadas no município de Acopiara possuem nascentes dos afluentes do rio Jaguaribe (Figura 9). Entre esses cursos d'água estão o Riacho Quincoê cujo curso foi barrado para construção da barragem que abastece a cidade de Acopiara.



Os atributos físicos apresentados nesse trabalho são instrumentos relevantes para caracterizar e entender os processos e as formas dos relevos da área de estudo, pois eles irão nortear as investigações ao longo da pesquisa e ajudar na interpretação dos resultados já encontrados.

Figura 09 – Mapa de bacias hidrográficas e drenagem.



Fonte: FUNCEME, 2013.

---

## CAPITULO 4

### ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS DA REGIÃO SERRANA DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ GERADAS ATRAVÉS DOS MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA

---

O primeiro resultado obtido foi divulgado sob a forma de artigo completo e aceito pela Revista Brasileira de Cartografia, cujo título era: “Análise Qualitativa e Comparativa das Variáveis Morfométricas da Região Serrana da Porção Sul do Maciço Central do Ceará Geradas Através dos MDE: SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA”. O trabalho apresenta a derivação das quatro variáveis morfométricas, geradas a partir de três MDE (TOPODATA, SRTM e GDEM) e apresentadas em três escalas distintas (1:100.000, 1:50.000, 1:25:000).

---

## COMUNICAÇÃO ENTRE EDITOR/AUTOR

---

Editor  
10/05/2014 11:13 AM Assunto: ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS DA REGIÃO SERRANA DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ GERADAS ATRAVÉS DOS MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA

---

O artigo será publicado se todas as correções dos avaliadores forem implementadas.

Editor  
10/05/2014 11:14 AM Assunto: [RBC] Decisão editorial EXCLUIR

---

Senhorita alcione moreira carmo:

Foi tomada uma decisão sobre o artigo submetido à Revista Brasileira de Cartografia, "ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS DA REGIÃO SERRANA DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ GERADAS ATRAVÉS DOS MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA".

A decisão é: ACEITO COM MODIFICAÇÕES

Prof. Alan José Salomão Graça  
Sociedade Brasileira de Cartografia - SBC  
alanjsg@gmail.com  
Alan Salomão - Secretário Executivo  
Conselho Executivo.

---

Avaliador B:

O trabalho tem uma conotação bem forte na aplicação, discutindo resultados de processamentos sobre modelamento do terreno de uma forma bem objetiva, e que poderá orientar futuros trabalhos na escolha mais adequada e confiável do uso de imagens de satélites para fins deste tipo de modelamento do relevo. Recomendo sua publicação, feitas as correções sugeridas.

---

Conselho Executivo  
Revista Brasileira de Cartografia - RBC  
<http://www.lsie.unb.br/rbc>

## **4 – ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS DA REGIÃO SERRANA DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ GERADAS ATRAVÉS DOS MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA**

### ***Qualitative and Comparative Analysis of The Morphometric Variables of The Mountain Region of The South Portion of The Massif Central in Ceará Generated Through MDE: SRTM, ASTER GDEM, and TOPODATA***

**Alcione Moreira do Carmo; Michael Vandesteem Silva Souto; Cynthia Romariz Duarte**

**Universidade Federal do Ceará – UFC  
Programa de Pós-Graduação em Geologia**

Campus do Pici, Departamento de Geologia, Bloco 912. Fortaleza/CE. CEP 60455-760

alcione.moreira@gmail.com

michael.souto@ufc.br

cynthia.duarte@ufc.br

### **RESUMO**

Com o avanço da informática nas últimas décadas houve também o avanço no armazenamento de banco de dados digitais espaciais e a facilidade de acesso e obtenção destes dados na rede mundial de computadores. Modelos digitais de elevação do terreno, por exemplo, que antes eram dados complexos e de difícil acesso, atualmente estão disponíveis gratuitamente na internet em diversas resoluções e acurácias para todo o globo terrestre. Muitos trabalhos desenvolvidos no meio científico utilizam os modelos digitais de elevações (MDE) para os mais diversos tipos de análises espaciais do terreno, porém poucos atentaram em verificar a qualidade dos dados e dos produtos obtidos através desses modelos que pudesse indicar qual é o melhor para um determinado tipo de análise ou o melhor resultado que possa apresentar para uma determinada escala de trabalho. Com base nestes questionamentos, este trabalho realizou uma análise qualitativa e comparativa de três MDE mais comumente empregados, por estarem disponíveis na internet (ASTER-GDEM, SRTM e TOPODATA). Estes modelos foram submetidos a uma série de processamentos em ambiente SIG para extrair e analisar diversas variáveis geomorfológicas e hidrológicas, como a declividade do terreno, as orientações das vertentes e as curvaturas verticais e horizontais, em três escalas distintas. Para isso, foi definida uma área-piloto situada geomorfológicamente nas serras da porção Sul do Maciço Central do Estado do Ceará, mais precisamente localizada entre os municípios de Acopiara, Mombaça e Piquet Carneiro. Os resultados obtidos por meio das análises qualitativa e comparativa entre os três tipos de MDE apresentaram respostas distintas entre si, principalmente devido à resolução espacial dos dados, que reflete no maior ou menor detalhamento da morfologia do terreno, bem como no destaque das linhas e dos sentidos de fluxos pelas curvaturas horizontais e verticais obtidas em cada escala analisada.

**Palavras-chave:** Geomorfologia, MDE, SRTM, ASTER-GDEM, TOPODATA, Variáveis Morfométricas.

### **ABSTRACT**

With the advancement of computer technology in recent decades came along the advancement of digital data and the ease of obtaining this information gathering from the World Wide Web. Digital models of ground elevations, for example, which generated data of complex and difficult access some years ago, are now available freely on the internet in different resolutions and accuracies for the entire globe. Many works developed in the scientific community use digital elevation models (DEM) for various types of analyses which are interested in searching, but few heeded to verify the quality of data and products obtained through these models which could indicate the best one for a particular type of analysis or may exhibit a better result for a given working range. Based on these questions, this study was designed to make a qualitative and comparative analysis of the three more available DEM (ASTER-GDEM, SRTM, and TOPODATA) on the internet, where they underwent a series of processes in a GIS environment to extract and analyze numerous geomorphological and hydrological variables such as land slope, the slope aspect and the profile and plan curvature at three different scales. For this, a pilot area located in the mountains of the South portion of the Central Massif from the State of Ceará, more precisely located between the cities of Acopiara, Mombaça, and Piquet Carneiro

was defined. The results obtained by means of qualitative and comparative analysis among the three types of MDE generated different answers from each other, primarily in relation to the spatial resolution of the data, which reflects greater or lesser details of the morphology of the terrain, as well as in highlighting the lines and directions of flows by the horizontal and vertical curves obtained for each analyzed scale.

**Keywords:** Geomorphology, DEM, SRTM, ASTER-GDEM, TOPODATA, Morphometric Variables.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos digitais de elevação (MDE) são ferramentas de estudo do terreno e de análises das variáveis geomorfológicas e hidrológicas, fornecendo informações básicas para caracterizar os atributos topográficos do terreno. Através deles podemos gerar parâmetros de análise morfométrica primários, como declividade, orientação de vertentes (OKSANEN e SARJAKOSKI, 2005; RAAFLAUB e COLLINS, 2006), curvaturas verticais e horizontais, linhas de fluxos, altitudes (WILSON e GALLANT, 2000), rede de drenagem, entre outros derivados (relevo sombreado, curvas de níveis e até lineamentos estruturais) utilizando-se de *softwares* específicos.

De acordo com Wilson (2012), a Geomorfometria Moderna consiste em extrair através da topografia digital, parâmetros da superfície da Terra e suas características espaciais. A utilização das principais variáveis morfométricas é de grande relevância para análise das formas de relevo e de sua evolução. Esse assunto tem sido largamente discutido no âmbito de sua eficácia no estudo da Geomorfologia Moderna, que utiliza ferramentas tecnológicas e estatísticas para dar suporte ao estudo das formas de relevo terrestre.

As variáveis como declividade, orientação de vertentes, curvaturas verticais e horizontais têm sido utilizadas como ferramentas de análise em várias áreas da Geociências para entender a dinâmica dos processos de evolução das paisagens (OZDEMIR, 2011) e de bacias hidrográficas (HE *et al.*, 2012; GREVE *et al.*, 2012; QIN *et al.*, 2009). Para Kawabata e Bandibas (2009) as variáveis morfométricas aliadas à Geologia podem ser excelentes ferramentas de delimitação das áreas de catástrofes ambientais, como os deslizamentos de terra, principalmente em áreas serranas mais degradadas.

Atualmente são disponibilizados vários produtos MDE com melhor resolução espacial e acurácia topográfica, dentre eles alguns são oferecidos gratuitamente na internet: SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model*) e TOPODATA (Tratamento dos dados SRTM realizados pelo Projeto Topodata do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE).

Os produtos MDE supracitados foram utilizados para análise qualitativa e comparativa entre eles, de forma a avaliar suas diferenças e as escalas que

melhor se adequem para análise geomorfológica. Para isso, foram escolhidos três níveis de escala de trabalho (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000), que são amplamente utilizadas em diversos tipos de trabalho, principalmente aqueles que são aplicados para a identificação e interpretação das variáveis morfométricas de área de relevo montanhoso. Logo, foi escolhida uma área-piloto para aplicação deste estudo, localizada na porção sul do Maciço Central, no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

### 1.1 Localização e Vias de Acesso da Área Pesquisada

A área-piloto pesquisada está situada na região Centro Sul do Estado do Ceará, compreendida entre os municípios de Acopiara, Mombaça e Piquet Carneiro, onde se encontra o conjunto de serras da porção sul do Maciço Central do Ceará, tendo como feições principais as serras do Maia, do Fonseca, do Flamengo e de São Miguel (Figura 1).

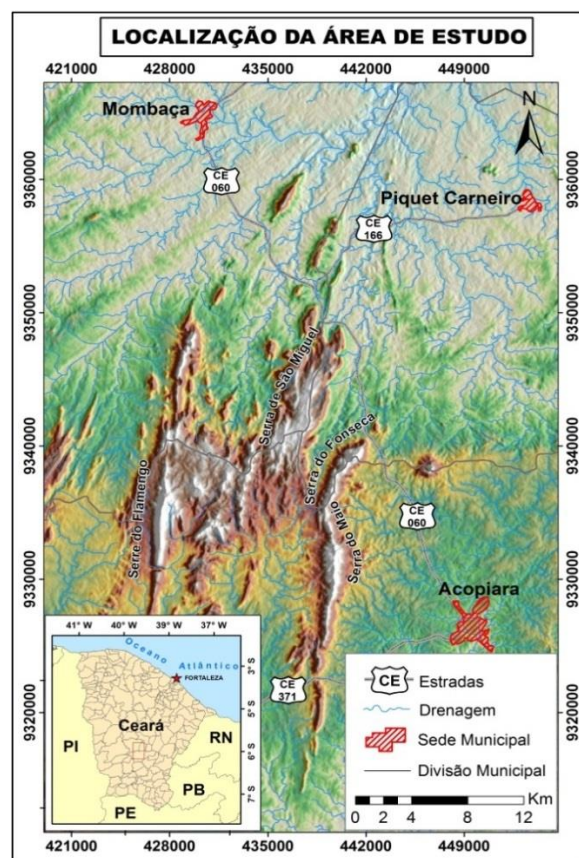


Fig. 1 – Mapa de localização da área de estudo adaptado a partir do MDE Topodata.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS

Atualmente já existem MDE disponíveis gratuitamente com resolução espacial de 30m, como obtida nas imagens ASTER-GDEM e de 90m para as imagens SRTM, que não dependem da fotogrametria e de interpolação de pontos planoaltimétricos e coletados em campo. No entanto, esses dados não estão livres de erros (ARNOLD, 2010). Os dados utilizados no trabalho foram adquiridos gratuitamente na rede mundial de computadores, como o SRTM e ASTER-GDEM, que estão disponíveis pelo *site* da USGS (*United States Geological Survey*) em <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> e o TOPODATA em <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>.

### 2.1 SRTM

O Programa *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) foi uma missão realizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em parceria com a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), a Agência Espacial Alemã (DLR) e a Agência Espacial Italiana (ASI), cujo objetivo principal era gerar um modelo de elevação para todo o globo terrestre com alta precisão, por meio da obtenção de dados SAR (radar de abertura sintética), que estava a bordo do ônibus espacial Endeavour. Esta missão teve a duração de 11 dias, sendo realizada entre os dias 11 a 22 de fevereiro de 2000 (FARR *et al.*, 2007; FONI e SEAL, 2004).

A partir desses dados coletados foi feito o MDE para aproximadamente 80% do globo terrestre, numa área limitada entre as latitudes 60° N e 54° S (PIERCE *et al.*, 2006), adquiridos por meio de técnica interferométrica, usando duas antenas refletoras separadas 60m uma da outra, onde os sensores RADAR operavam nas bandas C e X (JAKOB e VAN, 2001). Cada pixel da imagem é representado por um número complexo que contém a amplitude do sinal de retorno e a sua fase, possibilitando o cálculo da elevação topográfica do terreno.

Após recobrir todo o globo terrestre, os 12 TB de dados obtidos durante a missão foram processados para gerar o MDE com precisão vertical absoluta de  $\pm 16\text{m}$ , e relativa de  $\pm 10\text{m}$  (RABUS *et al.*, 2003), resolução espacial de 1 arco-segundo para os Estados Unidos, o que dá aproximadamente cerca de 30m de resolução espacial, e 3 arcos-segundo para o restante do mundo, que corresponderia uma resolução espacial de 90m. Os dados SRTM estão configurados no sistema de Coordenadas Geográficas e pelo *Datum* WGS-84 (SUN *et al.*, 2003).

### 2.2 TOPODATA

O Projeto TOPODATA foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e visou melhorar a resolução espacial de 3 arcos-segundo para 1 arco-segundo os dados SRTM da NASA, através

do método de Krigagem, corrigindo as imperfeições e preenchimento de falhas (VALERIANO e ROSSETTI, 2012). Isso foi possível por meio da aplicação de uma série de processamentos nos dados STRM para minimizar distorções locais e ruídos existentes nos dados brutos da NASA.

O MDE gerado pelos dados TOPODATA, bem como demais produtos derivados (declividade, orientação, curvatura vertical, curvatura horizontal, relevo sombreado e outros) estão estruturados em quadriculas compatíveis com a articulação de cartas topográficas na escala 1:250.000 do Brasil (VALERIANO, 2004) O MDE da área de estudo em questão disponibilizado pelo projeto TOPODATA estava sem referência espacial, logo foi necessário colocar a projeção desta imagem para o padrão do Sistema de Coordenadas utilizadas nas demais imagens analisadas neste trabalho.

### 2.3 ASTER-GDEM 2

Os dados ASTER-GDEM foram desenvolvidos pela parceria entre NASA e *Ministry of Economy, Trade, and Industry* (METI) do Japão por meio da aquisição das imagens do sensor ASTER – sensor passivo acoplado ao satélite Terra – *Earth Observing System* (EOS), com o intuito de melhorar a resolução espacial e a acurácia dos dados altimétricos. As referidas imagens foram captadas em pares, cujas cenas são de tamanho 60 x 60km, para aplicação da técnica de estereoscopia digital e extração dos dados altimétricos (TACHIKAWA *et al.*, 2011). Os dados ASTER-GDEM contemplam parte do globo terrestre entre as latitudes de 83° N e 83° S.

Os produtos GDEM 2 são a versão melhorada em relação ao GDEM 1, onde foi aplicado uma máscara de água para corrigir os erros em locais onde existiam ruídos nos dados pela interferência nos valores por causa dos corpos de água. A imagem GDEM 2 apresenta resolução espacial de 75m e precisão de 17m com 95% de confiabilidade, esses dados estão colocados em uma grade de 1 arco-segundo (aproximadamente 30m na Linha do Equador) disponibilizados já na referência do Sistema de Coordenadas Geográfica e *Datum* WGS-84 (ERSDAC, 2011). Os arquivos são disponibilizados em formato GeoTIFF (*Tagged Image File Format*).

### 2.4 Processamento dos Dados

Os processamentos dos dados foram realizados com *software* de PDI para mosaicar as imagens, e com *software* de SIG (ArcGIS® v9.3) para executar as devidas análises e integração das informações. Para chegar a um resultado comparável todas as imagens foram submetidas ao mesmo processamento, que foi executado em distintas etapas.

O primeiro passo no desenvolvimento do trabalho foi a aquisição das imagens, obtidas gratuitamente via internet, as quais tiveram que ser mosaicadas para cobrir toda região de estudo. Posteriormente, essas imagens mosaicadas foram

recortadas no tamanho exato da área pesquisada. A segunda etapa consistiu na correção dos dados e preenchimento dos *pixels* sem informações e na projeção e reprojeção cartográfica de todas as imagens, pois teriam que estar tanto em coordenadas geográficas como em coordenadas planas (sistema UTM) para execução das análises morfométricas (curvaturas vertical e horizontal em coordenadas geográficas e declividade e orientação de vertentes em UTM).

Os cálculos de todas as variáveis foram realizados automaticamente em ambiente SIG, por meio do *software* ArcGIS®, utilizando a ferramenta 3D Analyst. O cálculo da declividade (D) em porcentagem foi feito com base na equação (1), que corresponde a razão de dV (distância vertical) e dH (distância horizontal), multiplicado por 100 para dar o valor percentual. Seis classes de declividade em porcentagem foram definidas.

$$D = (dV/dH) * 100 \quad (1)$$

A orientação de vertentes (OV) foi obtida a partir de janelas móveis 3x3, utilizando um algoritmo que calcula os valores das oito células vizinhas para determinar o valor da célula central. Tomando como base a taxa de mudança de direção de X e Y para cada célula a orientação de vertentes foi calculada usando a equação (2). Posteriormente, o resultado dessa operação é então convertido em valores de direção da bússola (0-360 graus).

$$OV = 57,29578 * \text{atan2} ([dz/dy], - [dz/dx]) \quad (2)$$

Durante a manipulação dos dados percebeu-se que a declividade e a orientação apresentaram melhores resultados a partir do cálculo do MDE com projeção UTM, pois como os valores são tratados na unidade métrica, isto possibilitou que os resultados apresentados mostrassem áreas mais visivelmente delimitadas na comparação com os dados na projeção geográfica. As curvaturas vertical e horizontal (Z) são obtidas a partir do cálculo que utiliza janelas móveis 3x3, onde aplica-se a adaptação de um polinômio quadrático para cada célula (FENG e BAJCSY, 2005; MOORE *et al.*, 1991), como mostra a expressão matemática (3) abaixo:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3)$$

As derivadas das curvaturas verticais e horizontais apresentaram resultados significativos apenas nas operações realizadas a partir dos arquivos com coordenadas geográficas. Os mapas confeccionados para análise das variáveis morfométricas nas três escalas (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000) foram gerados para testar a relação resolução *versus* escala e então foi feita a comparação dos resultados.

### 3. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Gerar parâmetros morfométricos digitais a partir do MDE em *software* de SIG requer alguns cuidados quanto à resolução do produto utilizado e da escala de trabalho que se deseja usar (DRĂGUT e EISANK, 2011). Tendo como base os mapas derivados de um mesmo produto (MDE) em várias escalas, pode-se avaliá-los com relação às resoluções das imagens originais, e assim observar os detalhes dos resultados visualizados.

Saber a precisão cartográfica dos MDE utilizados como base para calcular as variáveis morfométricas é importante para entender precisão das feições geradas para análise do terreno. Os MDE TOPODATA, ASTER-GDEM e SRTM, tiveram seu Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) calculados e apresentados em alguns trabalhos, como os de Medeiros *et al.* (2009), Dias *et al.* (2011) e Moura *et al.* (2014), onde nesses trabalhos foi permitido enquadrar os referidos MDE em padrões de classes de exatidão cartográfica de acordo com as escalas de 1:100.000 e 1:50.000.

Então, a morfometria, por ter uma aplicação mais precisa da forma do terreno, necessita do apoio de mapas mais detalhados com escalas maiores que 1:100.000, onde se pode ter maiores detalhes a níveis locais, como a declividade da encosta, a forma e a orientação da vertente e a direção dos cursos dos fluxos. Por isso, a análise foi aplicada para as escalas em semi-detulhe (1:100.000, 1:50.000) e detalhe (1:25.000), pois são escalas amplamente utilizadas para execução de mapeamentos e análises morfométricas por multiusuários, e avaliar esses limites possibilitaria que os usuários escolhessem os melhores MDE de acordo com sua aplicação morfométrica.

#### 3.1 Declividade

O estudo da declividade é de fundamental importância para análise da geomorfologia, e quando associada à pedologia, à cobertura vegetal e a outros fatores (como o clima e orientação das vertentes), pode-se inferir os riscos de desmoronamentos ou deslizamentos de terras, auxiliando assim no planejamento e na prevenção de desastres naturais. Dependendo do grau de declividade é possível prever o tipo de erosão e o uso do solo. A declividade é definida como o ângulo de inclinação da superfície do terreno em relação a um plano horizontal com valores variando de 0° a 90°, embora seja mais expressa em porcentagem, de zero a infinito (VALERIANO, 2008).

O escoamento e a infiltração possuem uma forte relação com a declividade do terreno, e associada à litologia, tipo de solos, cobertura vegetal, precipitação de chuva e outros fatores morfométricos podem indicar um grau maior ou menor da probabilidade do risco de erosão das vertentes (PRADHAN, 2010). As declividades menos acentuadas favorecem a infiltração, portanto diminuem o risco de erosão dos solos. Os critérios utilizados para a classificação de declividade no presente trabalho foi o mesmo adotado pela Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária (EMPRAPA), que determinou seis classes de declividade, considerando o nível de inclinação do terreno em: Plano 0 - 3%; Suave Ondulado 3 - 8%; Ondulado 8 - 20%; Forte Ondulado 20 - 45%; Montanhoso 45 - 75%; e Escarpado acima 75% (EMPRAPA, 2006). A análise dos resultados foi feita por escala, e pode-se dizer que de forma geral existem similaridades entre os três MDE (Figura 3), apesar de que em alguns locais as imagens produzidas apresentaram diferenças de declividade. Ou seja, representaram a morfologia do terreno com pequenas variações em função da diferença de qualidade entre os modelos avaliados.

Em termos quantitativos, os produtos de declividade gerados a partir dos MDE TOPODATA, SRTM e ASTER-GDEM apresentaram distribuição de valores diferentes entre si, como mostrados nos histogramas das imagens de declividade (Figura 2), onde os valores máximos de declividade variaram entre as imagens: 111,13% para o TOPODATA (Figura 2A), 77,84% para o SRTM (Figura 2B) e 269,43% para o GDEM (Figura 2C). Isso ocorre porque os valores de declividade dados em porcentagem tendem ao infinito e essas discrepâncias de valores entre as imagens refletem o grau de detalhamento da topografia para os valores acima de 75%. Com relação à média dos valores de declividade nos três MDE ela fica equilibrada em todos os MDE avaliados, estando sempre aproximada em 8% de declividade (Figura 2). Isso indica que 50% dos valores de declividade do terreno estão entre 0-8% e os outros 50% estão distribuídos num relevo com declividades mais acentuadas, acima dos 8%, o que condiz com as características geomorfológicas reais do terreno analisado.

Na escala de 1:100.000 pôde-se observar que de forma geral as imagens dos modelos SRTM e TOPODATA apresentaram alta semelhança das classes de declividade, principalmente para as classes Ondulado e Forte Ondulado (Figura 3A). A imagem produzida pelo GDEM-2 também apresentou similaridades de relevo para essas classes de declividade, porém para as classes com valores inferiores a 20% (Plano, Suave Ondulado e Ondulado) as informações foram mais difusas, não apresentando uma uniformidade nas classes, impossibilitando destacar as direções do relevo. Para valores de declividade maiores que 75% (Escarpado), ressaltaram mais picos de elevações que nos demais modelos (Figura 3A). Nos modelos gerados na escala de 1:50.000, foram identificadas as mesmas situações vistas na escala 1:100.000, entretanto, pode-se destacar que houve uma perda de qualidade na resolução espacial da imagem SRTM, quando comparada com a imagem TOPODATA, que manteve a suavidade nas curvas das classes de declividade modeladas (Figura 3B). Na imagem GDEM, os problemas de difusão dos valores inferiores a 20% nas classes de declividade continuaram de forma até mais evidente e destacaram grande quantidade de áreas na classe Plano, talvez

ocorreu devido a aplicação da máscara de água nessas áreas mais planas, onde os valores topográficos tendem a zero. As classes com valores acima de 45% foram variando na quantidade de área ocupada, dando destaque para a classe Escarpado que detalharam os níveis mais íngremes da região estudada (Figura 3B).

Nas observações feitas em escala 1:25.000, pode-se ressaltar que a imagem gerada pelo SRTM não favoreceu uma análise de qualidade para declividade do terreno, pois os *pixels* não mostraram com clareza as informações requisitadas. Já na imagem TOPODATA a qualidade do produto gerado foi mantida, mesmo com a mudança de escala. Para a imagem produzida pelo GDEM a inconformidade dos dados atingiu até os valores de classe de declividade inferiores a 45%, que antes não estava clara nas análises das escalas anteriores. Pôde-se ainda observar pelos valores acima de 75% que o GDEM está próximo do limite da escala de análise, pois os *pixels* começaram a se destacar (Figura 3B).

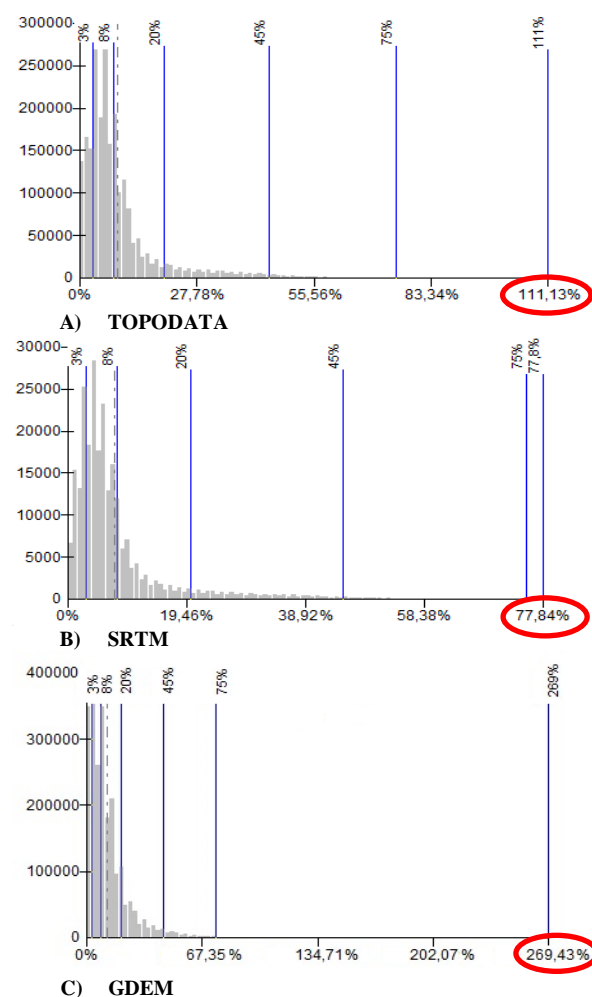


Fig. 2 – Histogramas representando a estatística das informações de declividade para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. Os valores máximos estão destacados em vermelho e a média está tracejada.



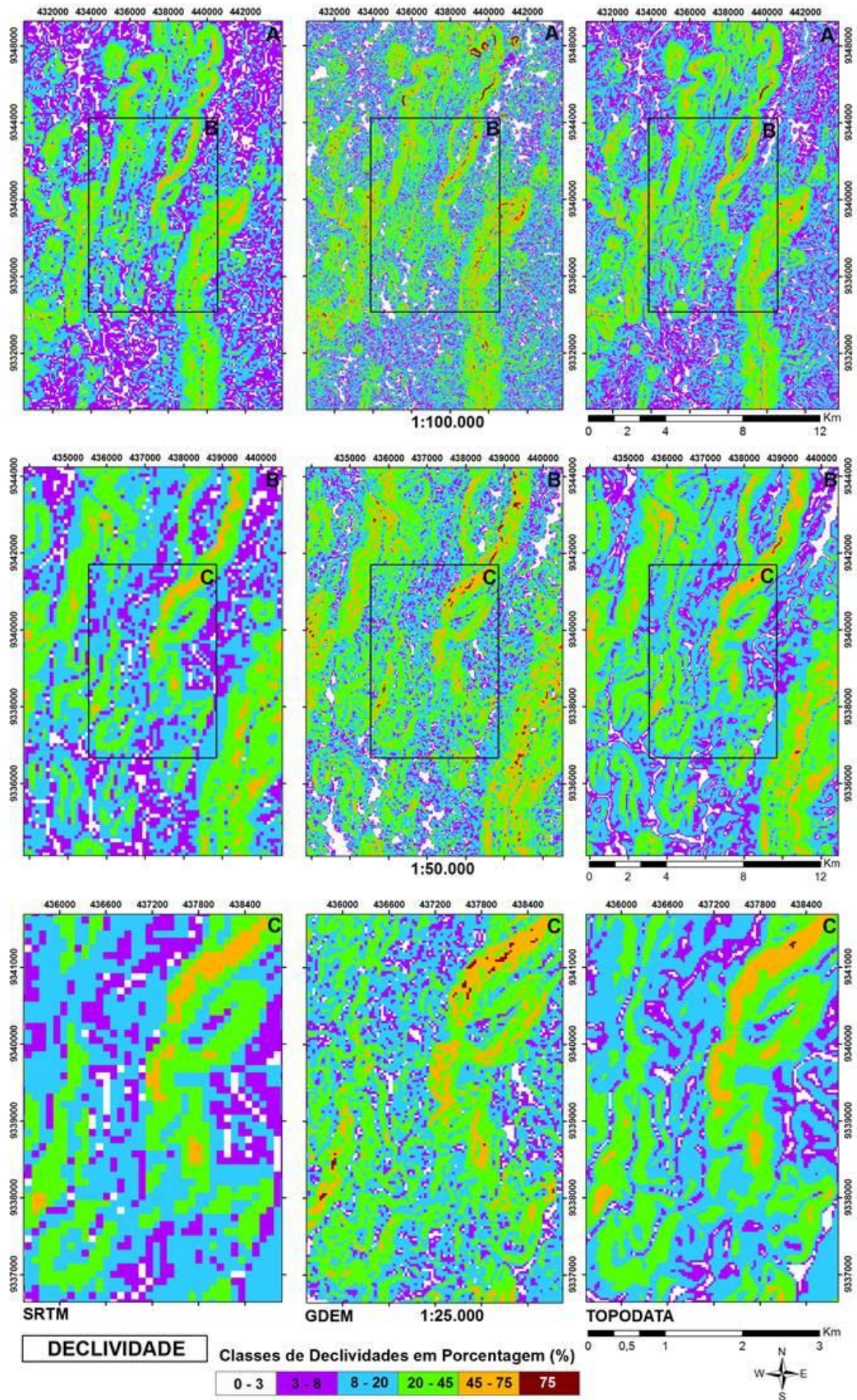


Fig. 3 – Mapa de declividade nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

### 3.2 Orientação de Vertentes

A orientação de vertentes é uma variável importante para entender a direção das linhas de fluxos de água e sedimentos. Através da definição da orientação desses fluxos podemos prever a direção de deslocamento dos movimentos gravitacionais. De acordo com Oliveira (1984) a orientação das vertentes também possui uma correlação com o clima e o grau de insolação em decorrência do movimento do sol durante o dia.

Diferentes posições de vertentes em determinadas regiões recebem umidade variável, favorecendo a diferenciação do intemperismo, da erosão, dos tipos de solos e da formação vegetal. Tal fato, associado ao grau de inclinação do terreno e à geologia, pode explicar a diferenciação de paisagens que pertencem à mesma formação geomorfológica, porém possui morfometria distinta, como no caso da serra do Fonseca, que possui vertentes orientadas em várias direções, refletindo na diferenciação da paisagem no local.

A metodologia para obtenção dessa variável mudou com o avanço da computação, que anteriormente era uma tarefa bem trabalhosa. O cálculo da orientação de vertente ou *aspect* em ambiente SIG é bem mais simples hoje em dia. Os MDE são bases bem eficientes para obtenção dos valores de direções das vertentes.

Os três modelos SRTM, GDEM e TOPODATA utilizados para o cálculo da orientação de vertentes apresentaram resultados similares no tocante à direção das vertentes quando analisados na escala de 1:100.000, que apresentaram direcionamento principal nas direções WNW e ESE (Figura 5A), porém em relação ao detalhamento das informações apresentadas nas demais escalas (1:50.000 e 1:25.000) os resultados foram bem diferentes entre eles (Figuras 5B e 5C). Este direcionamento principal das vertentes reflete o *trend* preferencial de NNE-SSW, no qual o conjunto de serras da região está orientado.

Analisando os dados estatísticos da orientação de vertentes dos três MDE verificou-se nos histogramas que há uma variação de frequência entre os modelos avaliados (Figura 4), que pode estar condicionada ao grau de detalhamento dos dados. Além de que em dois modelos apresentaram duas modas de distribuição de valores, para os modelos TOPODATA (Figura 4A) e SRTM (Figura 4B), que refletem bem os *trends* preferenciais de orientação das vertentes (NW-SE) e que denotam o alinhamento preferencial das serras NE-SW. O histograma do GDEM não distingue bem mesmo *trend* de orientação preferencial (Figura 4 C), isso porque a distribuição dos dados está posta de forma caótica, que não ajudam na interpretação visual.

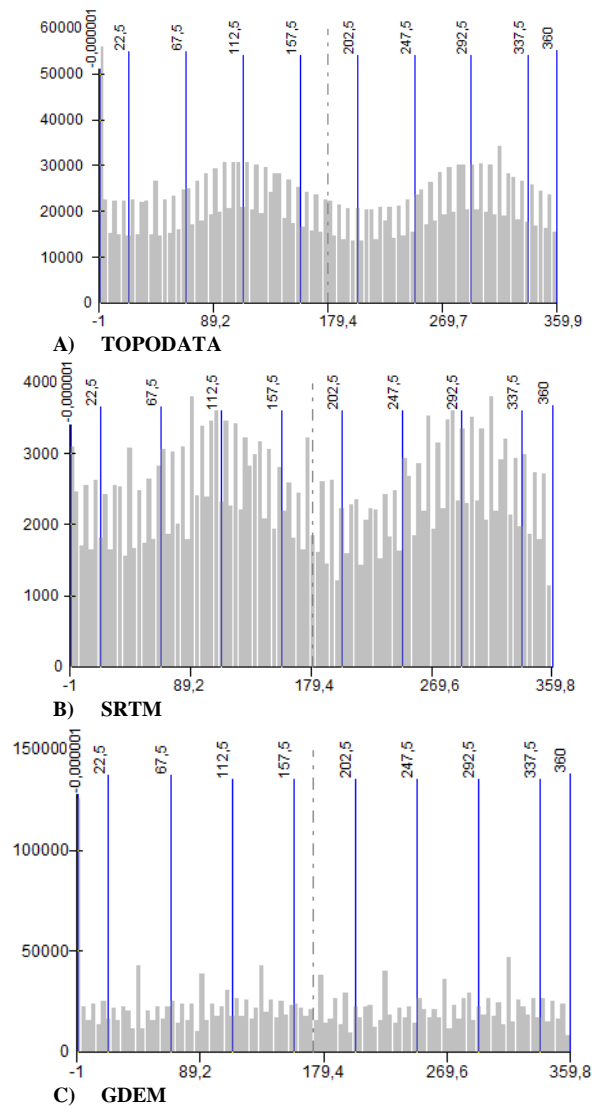


Fig. 4 – Histogramas representando a estatística das informações de orientação de vertentes para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. A média está tracejada.

Na comparação dos produtos de MDE na escala de 1:100.000 foi possível perceber que as imagens geradas do SRTM e TOPODATA foram mais semelhantes, diferindo-se na quantidade de áreas planas originadas, com o SRTM mostrando um número quase insignificante dessas feições (Figura 5A). Já o produto GDEM apresentou grande quantidade dessas informações, que se assemelham com alguns lineamentos das porções planas vistas no TOPODATA, principalmente na parte ao norte da área estudada (Figura 5A).

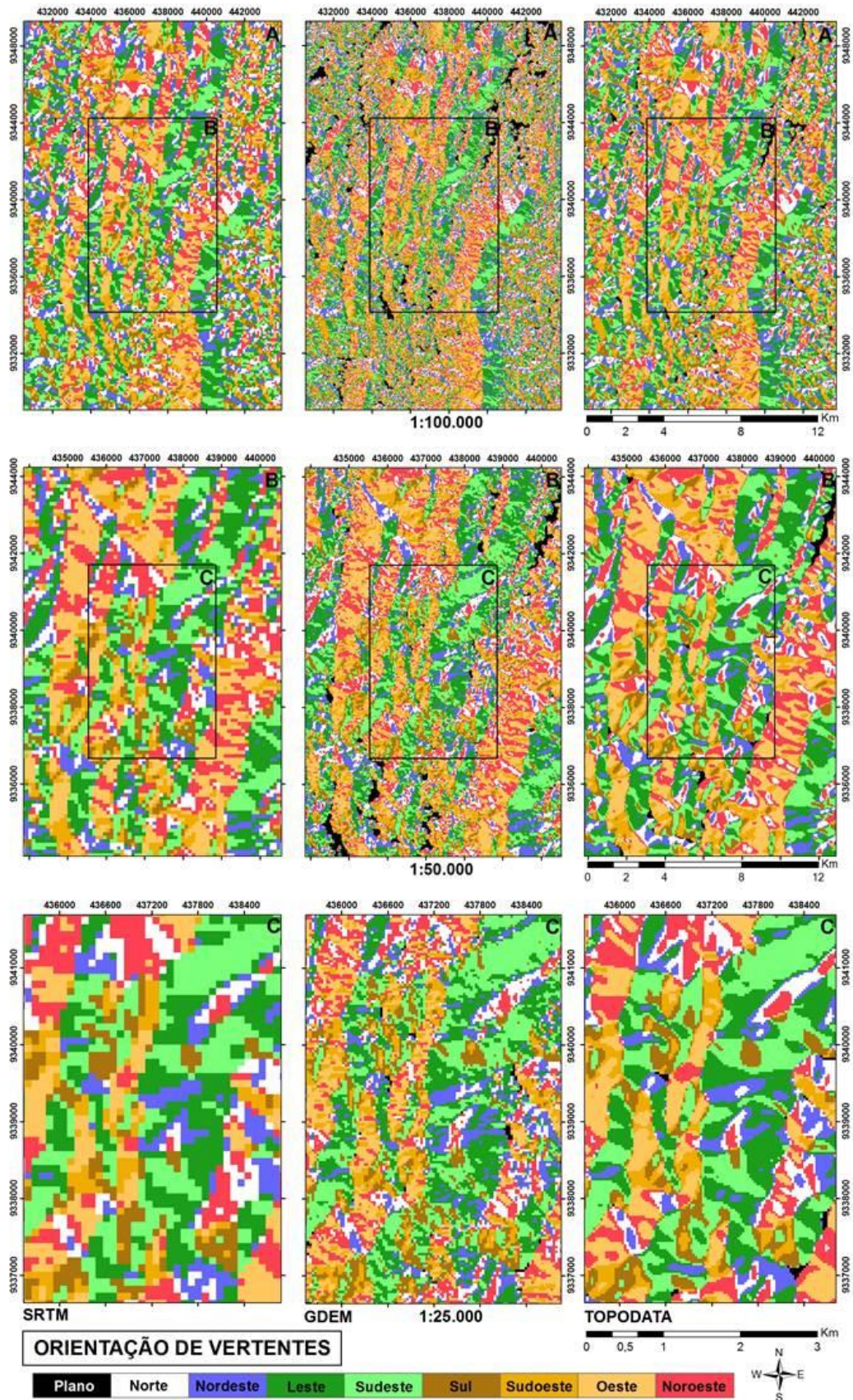


Fig. 5 – Mapa de Orientação de Vertentes nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

Na escala de 1:50.000 a imagem gerada pelo produto SRTM apresentou um início de perda da resolução, com os *pixels* começando a ser ressaltados na imagem, porém percebe-se a forte similaridade dos resultados quando comparados com a imagem do TOPODATA (Figura 5B). No MDE do GDEM observou-se que há informações mais detalhadas das orientações de vertente, refletindo melhor a rede de drenagem existente na área pesquisada. Os aspectos gerados a partir do TOPODATA foram os mais bem delineados, representando apenas as vertentes mais significativas para esse nível de detalhamento (Figura 5B).

A avaliação feita na comparação dos produtos MDE na escala 1:25.000 mostrou que os resultados foram bem diferentes entre os três analisados. A imagem SRTM não é a mais adequada para analisar as orientações de vertente neste nível de escala, pois a resolução da imagem ficou muito ruim, dificultando a visualização das feições (Figura 5C). As imagens do GDEM e do TOPODATA apresentaram melhores resultados visuais, porém já estão no limite da resolução da imagem, com os *pixels* começando a se tornar visíveis, dificultando uma melhor análise, como foi o caso da imagem do GDEM, apesar do maior detalhamento das vertentes. Já a imagem do TOPODATA originou feições mais delimitadas, facilitando a distinção e classificação dos sentidos das principais orientações de vertentes (Figura 5C).

### 3.3 Curvatura Horizontal

A curvatura horizontal indica padrões de divergência ou convergência das linhas de fluxos (água, sedimentos, minerais e matéria orgânica). Normalmente essas linhas podem ser planares representada por valores nulos, convergentes por valores negativos e divergentes por valores positivos (DUMAS *et al.*, 2010). A curvatura horizontal é uma importante variável do escoamento superficial, pois se pode prever a expansão da drenagem e suas possíveis consequências de alagamento. Se associada a outras variáveis como curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal exerce um importante controle sobre a vazante dos fluxos superficiais (HILBERTS *et al.*, 2004).

O caráter divergente da curvatura mostra o alargamento das linhas de fluxos, podendo indicar topografia mais suave ou vales abertos, e o aspecto convergente sugere um estreitamento dos caminhos do escoamento formando vales mais fechados. A aplicação da curvatura horizontal não é adequada a áreas extensas, ou seja, a aplicação dessa variável é interessante em áreas pequenas representadas em escala de detalhe (VALERIANO, 2008).

De acordo com os dados estatísticos analisados por meio dos histogramas dos três MDE, podemos avaliar que há um equilíbrio nos valores positivos e negativos (Figura 6), o que indica que o relevo estaria numa posição intermediária entre

íngreme e suave. No entanto, percebe-se uma tendência maior nos valores positivos do que negativos para os dados extraídos da imagem GDEM (Figura 6C), o que corrobora com a imagem produzida (Figura 7), ou seja, o terreno tende a ser mais suavizado e impossibilitando a delimitação dos tipos de curvatura horizontal. Então, como os dados das imagens TOPODATA e SRTM estão mais equilibrados na distribuição de valores positivos e negativos (Figura 6A e 6B), permitiram uma melhor análise para esta morfometria.

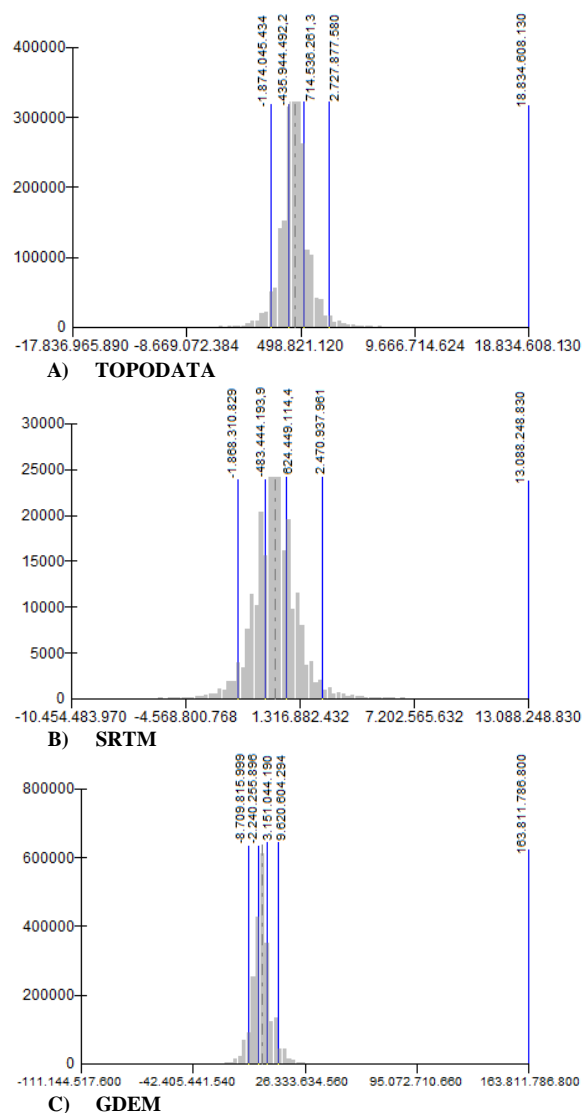


Fig. 6 – Histogramas representando a estatística das informações de curvatura horizontal para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. A média está tracejada.

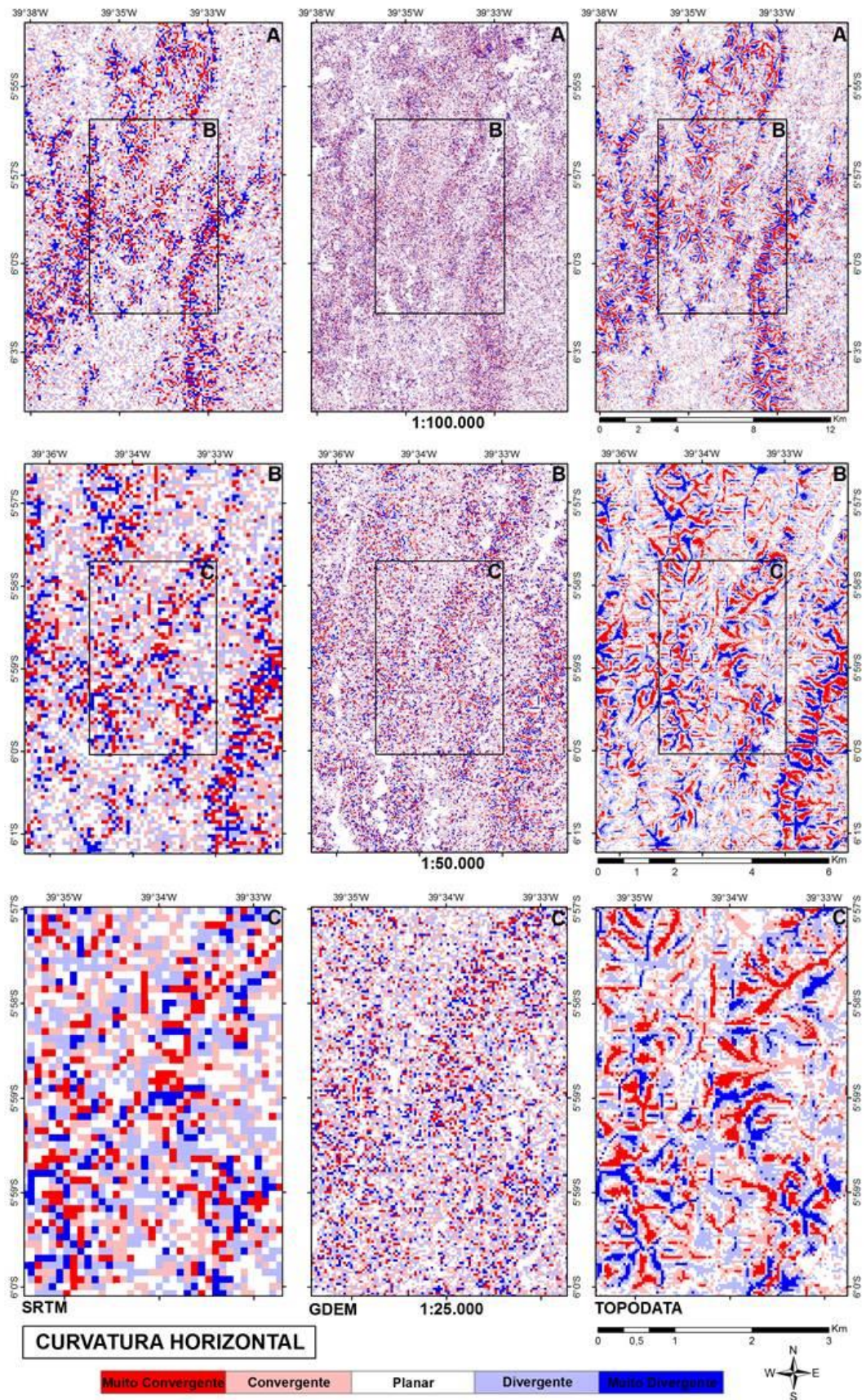


Fig. 7 – Mapa de Curvatura Horizontal nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

A análise visual da curvatura horizontal feita nos três MDE mostrou que apenas o TOPODATA gerou imagens com dados mais concisos e de boa resolução em todas as três escalas avaliadas (Figura 7), porém as feições de curvatura horizontal ficaram mais evidentes nas escalas de 1:50.000 e 1:25.000 (Figuras 7B e 7C). A imagem do produto SRTM só poderia ser utilizada na escala de 1:100.000, pois com esse nível de detalhamento ainda se consegue identificar os tipos de curvaturas (Figura 7A), nas demais escalas esse MDE não seria mais útil por causa do comprometimento da qualidade da visualização das feições. Para análise da curvatura horizontal a partir do produto GDEM não foi possível fazer a identificação das feições divergentes e convergentes com clareza devido à grande quantidade de informações que a imagem oferece, o que ocasiona um “ruído” no resultado pela complexidade na matemática aplicada na interpolação dos dados, porém se consegue identificar as feições planares com mais clareza do que nos outros modelos avaliados (Figura 7).

### 3.4 Curvatura Vertical

O estudo da curvatura vertical refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno quando analisado em perfil (VALERIANO, 2003a). A análise dos tipos de curvaturas vertical de vertentes é interessante do ponto de vista morfológico, pedogenético e hidrológico. O caráter vertical da curvatura associado à declividade, ao clima e ao substrato do terreno pode inferir o tipo de solo formado na vertente, sua possível movimentação por gravidade e até prováveis pontos de acumulação. Sua aplicabilidade também é bem sucedida no mapeamento geomorfológico e pedológico.

As imagens geradas em ambiente SIG através de cálculos automáticos de MDE, bem como de técnicas manuais, apresentam valores negativos, positivos e nulos na representação numérica das formas verticais dos relevos. Teoricamente vertentes retilíneas apresentam valor de curvatura nulo, vertentes côncavas têm valores positivos e vertentes convexas os valores de curvatura são negativos (ANJOS e MENEGUETTE JUNIOR, 2007; VALERIANO, 2003b). No entanto, esses valores podem se inverter, os valores negativos representando curvaturas côncavas e os valores positivos representando as curvaturas convexas (AKGÜN e TÜRK, 2011; JULIAN *et al.*, 2012). No caso das imagens geradas os valores que corresponderam à realidade do mapa foram positivos para curvatura côncavas e negativos para convexas.

Analisando os dados estatísticos representados pelos histogramas produzidos pelos três MDE estudados determinou-se que existe uma diferença clara entre os dados do GDEM com os dados dos demais modelos, onde os valores concentram-se mais

no lado positivo (Figura 8C), o que gera uma maior quantidade de curvaturas verticais do tipo côncava.

Os histogramas dos modelos TOPODATA e SRTM denotam uma tendência maior para valores negativos (Figura 8A e 8B), o que implica numa maior quantidade de curvaturas verticais do tipo convexa. Pelo conhecimento da área de estudo a tendência é que seja mais representativa a ocorrência de curvaturas convexas pela caracterização geológica, onde os terrenos são compostos por gnaisses e granitos.

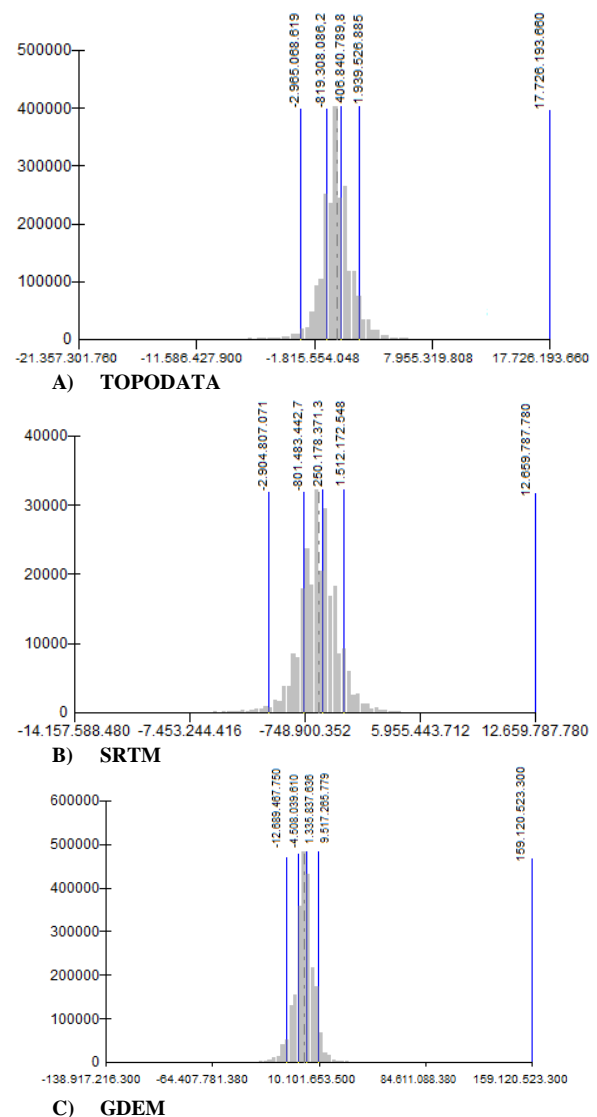


Fig. 8 – Histogramas representando a estatística das informações de curvatura vertical para os três MDE avaliados: (A) TOPODATA, (B) SRTM e (C) GDEM. A média está tracejada.

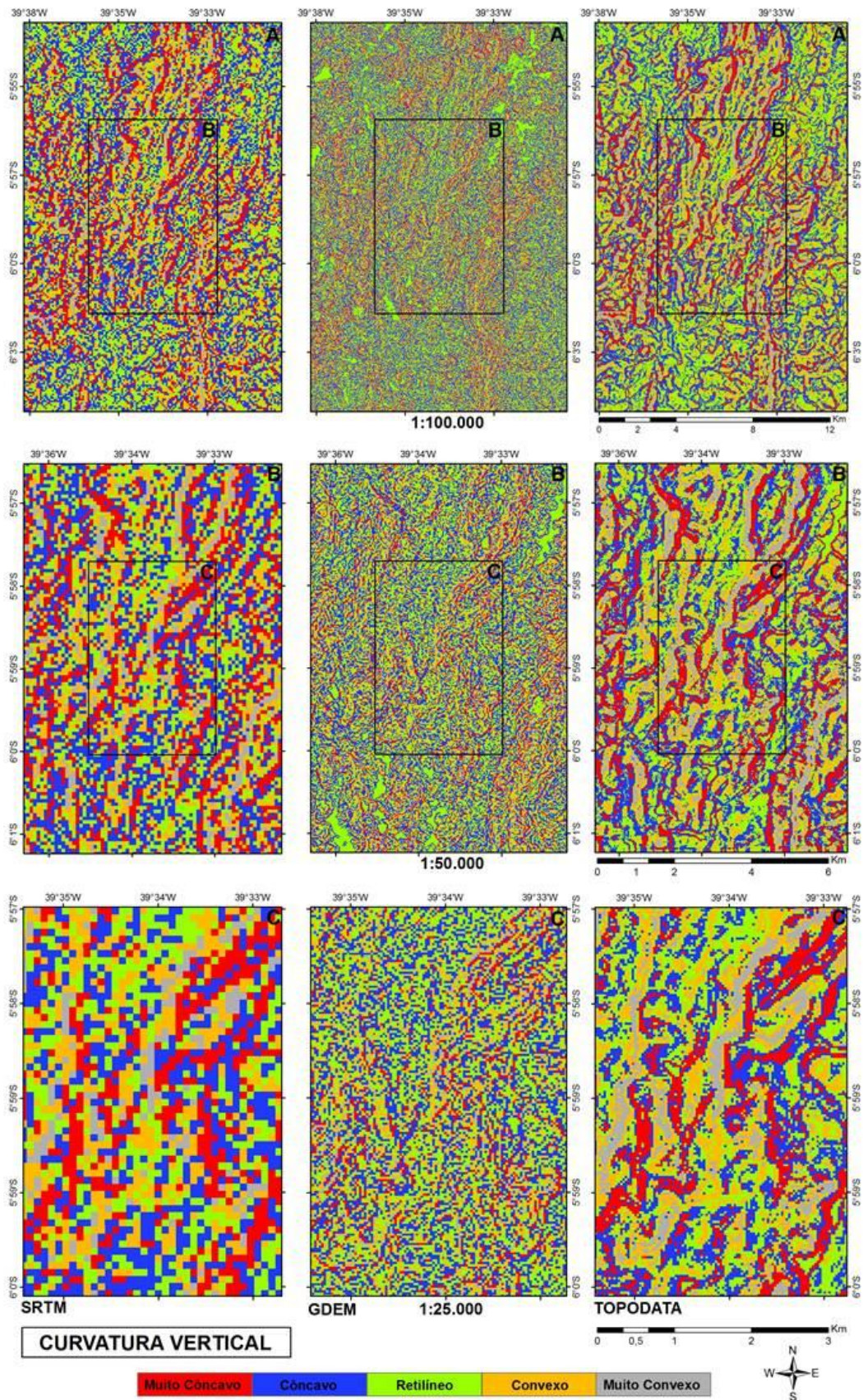


Fig. 9 – Mapa de Curvatura Vertical nas escalas de (A) 1:100.000, (B) 1:50.000 e (C) 1:25.000, utilizando como base os MDE SRTM, GDEM, TOPODATA.

A análise qualitativa dos produtos de curvatura vertical dos três MDE apresentaram resultados diferentes para as feições de curvatura vertical em todas as escalas trabalhadas no mapa (1:100.000, 1:50.000, 1:25.000). No que diz respeito à qualidade das imagens, o TOPODATA foi o que obteve o melhor resultado em todos os níveis de detalhamento (Figura 9). Na avaliação feita para análise da curvatura vertical na escala de 1:100.000 constatou-se que tanto o produto SRTM como o produto TOPODATA geraram imagens de boa qualidade visual. A imagem do SRTM mostrou a existência de mais feições de curvatura muito côncavas e muito convexas na área estudada, porém a imagem do TOPODATA apresentou uma maior quantidade de curvaturas retilíneas. O GDEM originou uma imagem muito desfocada, não permitindo a identificação clara das formas de curvatura vertical (Figura 9A).

A análise realizada na escala de 1:50.000 apontou que a qualidade da imagem SRTM ficou comprometida pela sua resolução espacial. O produto de curvatura vertical produzido pelo MDE da imagem GDEM mostraram as feições mais suavizadas, sem deixar claras as delimitações dos tipos de curvaturas verticais avaliadas. Este efeito foi causado pela grande quantidade de informações contida na imagem (Figura 8C). E o MDE do TOPODATA gerou uma imagem com excelente resolução, proporcionando uma melhor identificação dos tipos de curvaturas em perfil (Figura 5B). Para a escala 1:25.000, constatou-se que o dado TOPODATA está no limite da sua resolução, mas que mesmo assim continua o melhor entre os três modelos avaliados para este tipo de análise, onde tanto o produto SRTM como o produto GDEM não apresentaram com clareza as informações de curvatura vertical (Figura 9C).

O MDE TOPODATA obteve o melhor desempenho em todas as variáveis morfométricas geradas e em todas as escalas testadas, que de acordo Fernández *et al* (2012), o TOPODATA apesar de suas limitações é compatível para execução de trabalhos com a escala de 1:100.000 e menores. Nesse sentido Miceli *et al.* (2011) calculou o PEC dos MDE SRTM, ASTER-GDEM e TOPODATA para uma região de relevo acidentado, semelhante à área teste, e pôde confirmar que o TOPODATA obteve os melhores resultados em relação ao cálculo do PEC, atingindo as classes de padrão A e B, para as escalas de 1:100.000 e 1:50.000, respectivamente.

Segundo Medeiros *et al.* (2009), o MDE SRTM, que obteve PEC classe A para escala de 1:100.000, esse fato pode explicar o relativo bom desempenho desse MDE para geração das variáveis morfométricas e apresentadas nessa mesma escala, principalmente para variável de declividade, que apresentou uma boa precisão cartográfica nas áreas de declividades baixas até em locais de declividades mais acentuada. De fato nesse trabalho o MDE SRTM, obteve razoável desempenho para dos produtos declividade e orientação de vertentes. Nesse sentido

Fornelos e Neves (2007), corroboram que o SRTM, pode gerar cartas de declividades e orientação de vertentes, compatíveis com a escala de até 1:100.000.

Além disso, Miceli *et al.* (2011) conseguiu determinar pelo estudo que fizeram que em relevos fortemente ondulados a montanhosos os MDE do TOPODATA apresentaram os melhores resultados de análise morfométrica, corroborando com os resultados obtidos aqui neste trabalho. Mas eles afirmam também que para relevos suave ondulado a ondulado os produtos do ASTER-GDEM tiveram melhor desempenho, o que é de certa forma correta quando visto na escala de 1:25.000 um maior detalhamento do relevo nos mapas de declividade e de curvatura vertical.

#### 4. CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho foi a realização de análises comparativas/qualitativas dos produtos de variáveis morfométricas (declividades, orientação de vertentes, curvaturas horizontal e vertical) gerados a partir dos MDE do SRTM, do GDEM e do TOPODATA, utilizando três escalas de observação (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000). Estas análises permitiram avaliar quais modelos e quais escalas foram mais adequadas para representar tais variáveis para a área em estudo.

Pôde-se concluir que apesar de que cada MDE tem sua aplicação na geração das variáveis morfométricas, o modelo que obteve o melhor desempenho de uma forma geral foi o do TOPODATA, em todas as escalas avaliadas. O MDE do SRTM também surpreendeu nos resultados analisados, onde apresentou bons resultados na escala de 1:100.000, muitas vezes similares aos do TOPODATA, porém em outras escalas a qualidade dos resultados obtidos foi comprometida pela limitação da sua resolução espacial, o que também é corroborado pela análise feita nos dados estatísticos.

As imagens das variáveis morfométricas feitas para o produto GDEM, apesar de toda sua riqueza de dados, não apresentou bons resultados, principalmente na escala de 1:100.000, pois em muitas dela a qualidade dos resultados era comprometida pela grande variedade de informação, denotando muitas vezes um resultado difuso, sem clareza na informação analisada, que pelos dados estatísticos mostraram uma tendência na suavização da morfologia do terreno, o que complica qualquer tipo de análise morfométrica. Vê-se que os resultados estão dependentes diretamente da resolução espacial das imagens e que imagens interferométricas são melhores para geração de MDE do que imagens ópticas, neste caso por causa do processo ser simplesmente por paralaxe e não por interseção de circunferências contendo o ponto P no espaço.

As variáveis morfométricas são de grande importância na análise local e até regional das formas de relevo e da dinâmica dos elementos que neles se instalam (formação de solo, vegetação e orientação da



dinâmica de fluxos). Essas variáveis morfométricas associadas ao conhecimento da geologia, dos solos, do clima e da cobertura vegetal local, permite que seja feita uma previsão mais coerente da evolução dos relevos com topografias mais acentuadas (regiões serranas), permitindo dessa forma a possibilidade de mensurar a localização de possíveis pontos mais suscetíveis a deslizamentos de encostas, bem como prováveis áreas de maior erosão e acumulação de sedimentos. Os MDE, disponíveis gratuitamente, podem fornecer essas condições de análise em escalas de médio detalhe. Estudos de maior detalhamento, em escalas locais, em nível de vertente, necessitam de modelos com maior acurácia e resolução.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará pelo apoio a realização da pesquisa e ao Laboratório de Geoprocessamento do CE (GEOCE) pela disponibilidade do espaço, material e equipamentos para pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKGÜN, A.; TÜRK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalik region, NW Turkey. **Computers & Geosciences**, v. 37, p. 1515-1524, 2011.
- ANJOS, D. S.; MENEGUETTE JUNIOR, M. Análise da Curvatura de Vertentes via Thin Plate Spline e Inferência Fuzzy. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA E V COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2007, Presidente Prudente. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Presidente Prudente, 2007.
- ARNOLD, N. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. **Progress in Physical Geography**, v. 34, n. 6, p. 781-809, 2010.
- DIAS, F. M.; MICELI, B. S.; 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. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.411, 2011.
- DRĂGUT, L.; EISANK, C. Object representations at multiple scales from digital elevation models. **Geomorphology**, v. 129, p. 183-189, 2011.
- DUMAS, P.; INTEMPS, J. P. R.; MANGEAS, M.; LUNEAU, G. Developing erosion models for integrated coastal zone management: A case study of The New Caledonia west coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 61, p. 519-529, 2010.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. P. 306.
- ERSDAC, LP DAAC. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Global digital elevation model (GDEM) Version. **ASTER GDEM 2 Readme**, 2011.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, RG2004, 2007.
- FERNÁNDEZ, D. C. J.; VALERIANO, M. M.; ZANI, H.; ANDRADES FILHO, C. O. Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 64/05, p. 619-634, 2012.
- FENG, W-W.; BAJCSY, P. Extracting Topographic Features From Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Images. **Technical Report**, 2005.
- FONI, A.; SEAL, D. Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control. **Acta Astronautica**, v. 54 p. 565-570, 2004.
- FORNELOS, L. F.; NEVES, S. M. A. S. Uso de modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na estimativa de perdas de solo. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 59/01, 2007.
- GREVE, M. H.; KHEIRA, R. B.; GREVE, M. B.; BØCHER, P. K. Quantifying the ability of environmental parameters to predict soil texture fractions using regression-tree model with GIS and LIDAR data: The case study of Denmark. **Ecological Indicators**, v. 18, p.1-10, 2012.
- HE, S.; PAN, P.; DAI, L.; WANG, H.; LIU, J. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan

- River delta, Three Gorges, China. **Geomorphology**, v. 171-172, p. 30-41, 2012.
- HILBERTS, A.G.J.; LOONA, E.E.V.; TROCHA, P.A.; PANICONI, C. The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 160-173, 2004.
- JAKOB, J.; VAN, Z. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, Great Britain, v. 48, n. 5-12, p. 559-565, 2001.
- JULIAN, J. P.; ELMORE, A. J.; GUINN, S. M. Channel head locations in forested watersheds across the mid-Atlantic United States: A physiographic analysis. **Geomorphology**, v. 177-178, p.194-203, 2012.
- KAWABATA, D.; BANDIBAS, J. Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN). **Geomorphology**, v. 113, p. 97-109, 2009.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 61/02, 2009.
- 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**, Nº 63/01, 2011.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MOURA, L. Z.; BIAS, E. S.; BRITES, R. Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 66/01, p. 1-14, 2014.
- OKSANEN, J.; SARJAKOSKI, T. Error propagation of DEM-based surface derivatives. **Computers & Geosciences**, v. 31, p.1015-1027, 2005.
- OLIVEIRA, M. C. Construção de uma carta para determinação de orientação de vertentes. **Revista do Instituto Geológico**, v. 5, n.1/2, p. 47-50, 1984.
- OZDEMIR, A. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. **Journal of Hydrology**, v. 411, p. 290-308, 2011.
- PIERCE, L.; KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; BARROS, O. Evaluation of the Horizontal Resolution of SRTM Elevation Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1235-1244, 2006.
- PRADHAN, B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. **Advances in Space Research**, v. 45, p. 1244-1256, 2010.
- QIN, C-Z.; ZHU, A-X.; SHI, X.; c, LI, B-L.; PEI, T.; ZHOU, C-H. Quantification of spatial gradation of slope positions. **Geomorphology**, v. 110, p.152-161, 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**, v. 21, p.710-732, 2006.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57 p. 241-262, 2003.
- SUN, G.; RANSON, K. J.; KHARUK, V.I.; KOVACS, K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 401-411, 2003.
- TACHIKAWA T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; CARABAJAL, C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. In: MEYER, D. (Org.). **ASTER GDEM Validation Team**, NASA, p. 26, 2011.
- VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de modelos digitais de elevação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 11, 2003. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte: 2003, INPE, p. 409-411, 2003a.
- VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003b.
- VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de

Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72 p., 2004.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais.** São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72 p., 2008.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.

WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, p. 107-121, 2012.

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

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

---

## CAPITULO 5

VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS COMO  
SUBSIDIO À ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE AO RISCO  
GEOLÓGICO A EROSÃO

---

## **5 – VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS COMO SUBSÍDIO À ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE AO RISCO GEOLÓGICO A EROSÃO**

Depois de vários testes envolvendo os modelos digitais de elevações SRTM, ASTER-GDEM e Topodata, pôde-se constatar que o MDE do Topodata é o melhor para gerar as variáveis morfométricas declividade, orientação de vertentes, e curvaturas vertical e horizontal. Os dados adquiridos do Projeto Topodata também disponibilizam arquivos *raster* de todas as variáveis geradas, no entanto, estes não foram utilizados, pois preferiu-se gerar essas variáveis de forma controlada utilizando o *software* ArcGIS® a partir do MDE original, possibilitando assim a escolha das melhores definições de classes de acordo com a análise da estatística dos dados avaliados.

Para validar os produtos gerados a partir do MDE do Topodata foi realizado um trabalho de campo, que consistiu em percorrer a área estudada, pelas estradas e trilhas, realizando perfis topográficos para marcação de pontos de observação que pudessem ser usados como identificação das feições morfométricas, que foram previamente tratadas e geradas em perfis no laboratório pelo dado Topodata. A partir deste levantamento pôde-se ter uma visão mais ampla dos tipos de vertentes e de processos geomorfológicos que ocorrem nas serras estudadas. Todas essas ocorrências foram registradas através de fotografias tiradas de uma câmera digital, e foram georreferenciados por GPS de navegação, configurado no Sistema de Coordenadas UTM e *Datum* WGS-84.

A escala de 1:100.000 foi a escolhida para confecção dos mapas temáticos para validação das variáveis morfométricas. Zuquette e Gandolfi (2004) indicam essa escala como uma das mais adequadas para o mapeamento de risco geológico e geotécnico em Escala Regional. A escolha desse tamanho de representação cartográfica foi influenciada pelo nível de detalhe que ela oferece e também pela cobertura de quase 100% da área dos pontos visitados no levantamento de campo.

### **5.1 – Validação em campo dos mapas das variáveis morfométricas**

A validação dos produtos das variáveis morfométricas extraídas a partir do MDE do Topodata, como declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e curvatura horizontal, foi de fundamental importância para verificar se o modelo gerado computacionalmente é confiável e representativo em relação à realidade. Para o levantamento

dessas informações foram necessárias a coleta dos dados em campo entre os dias 13 e 17 de julho de 2014, com registros fotográficos da paisagem, a marcação dos pontos de coordenadas e a análise de processos geomorfológicos inseridos no sistema *in situ*. De acordo com os dados levantados em campo os níveis de declividade e os tipos de curvaturas verticais das vertentes estão condizentes com os perfis digitais extraídos do MDE, e os registros fotográficos comprovaram isso. Além disso, as curvaturas horizontais foram conferidas também em campo e devidamente identificadas como poderão ver nos itens a seguir.

### **5.1.1 – Declividade**

O Mapa de Declividade teve por objetivo avaliar o grau de inclinação do terreno de acordo com o modelo estabelecido pela EMBRAPA (2006), podendo determinar as classes de declividade a partir dos valores obtidos na extração do MDE do Topodata. Com base nisso podemos fazer as seguintes considerações vistas no mapa (Figura 10):

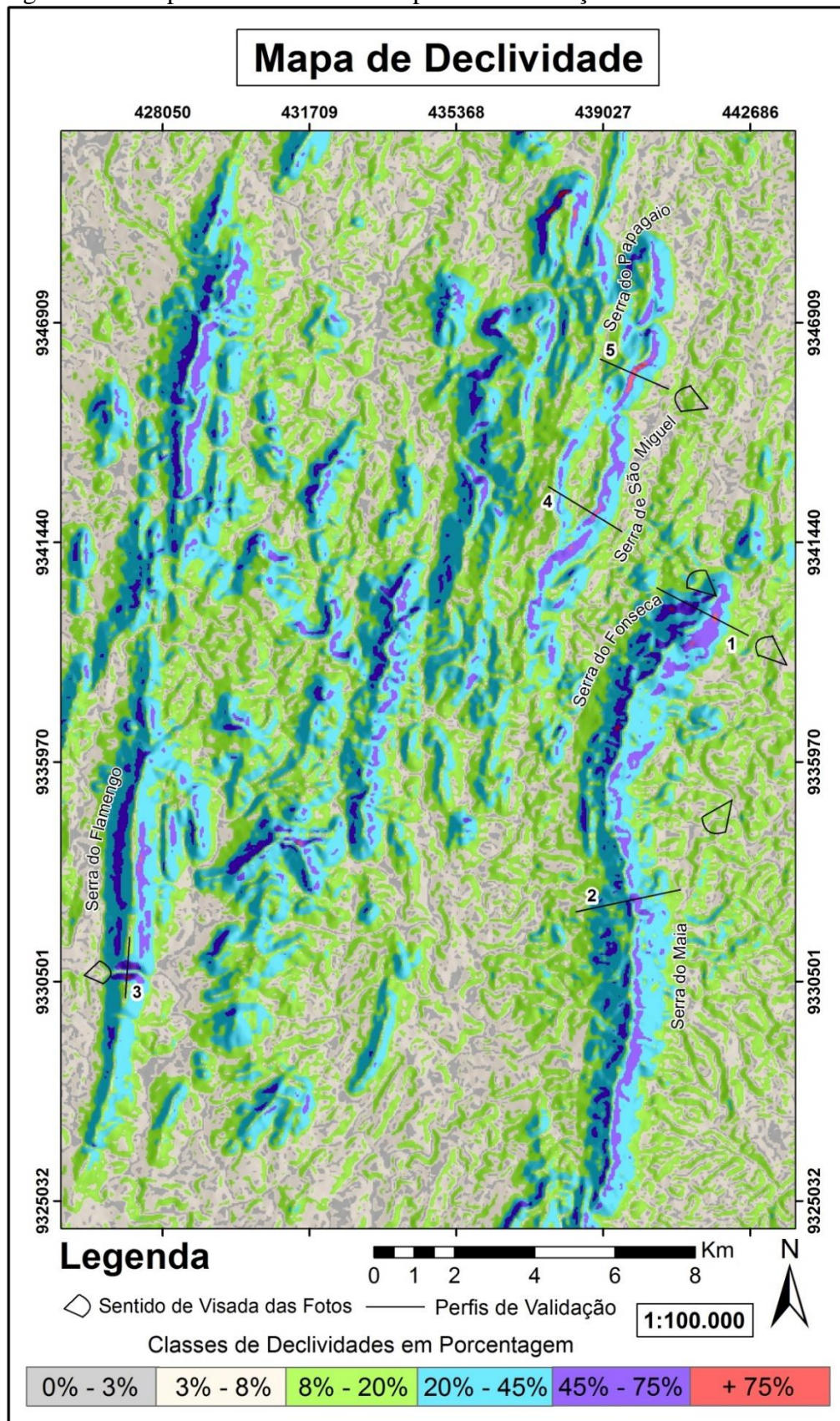
As partes localizadas nos extremos Norte e Sul da área estudada (Figura10) podem ser classificadas como terreno plano a suave ondulado (0 a 8%);

Na porção central da área de estudo a classe dominante é a de terreno ondulado a fortemente ondulado (8 a 45%) (Figura 10);

E a classe montanhosa (45 a 75%) também predomina na porção central da área pesquisada (Figura 10), tendo a classe escarpada (>75%) situada mais a Leste do terreno montanhoso, nas serras de Fonseca e de São Miguel (Figura 10). A relação da escarpa pode estar representando a zona de empurrão, visto no Mapa Geológico (Figura 05).

Então, o Mapa de Declividade também mostrou que os setores com topografia mais acentuada são compostos em sua maioria por declives acima de 20% (Figura 10), o que corrobora com o entendimento de que a área de estudo é um terreno fortemente irregular. Para validar as informações tratadas em laboratório foram executados perfis e tiradas fotografias em campo para mostrar se os níveis das declividades extraídos do MDE do Topodata representam de fato a realidade.

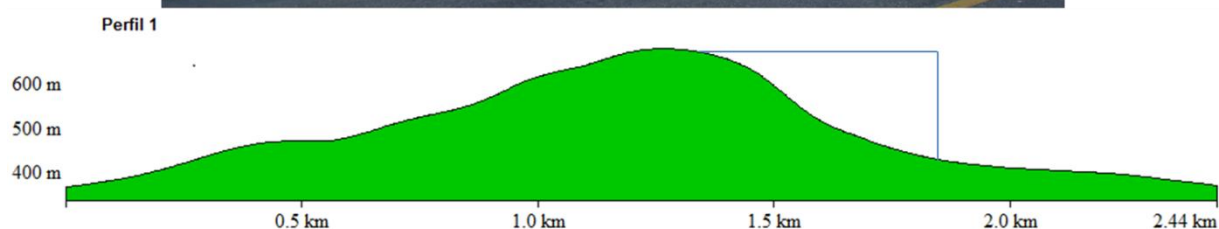
Figura 10 – Mapa de declividade com perfis de validação.



Fonte: Autor, elaborado a partir do MDE do Topodata.

O Perfil 1 foi traçado na porção mais ao Norte da Serra do Fonseca e mostrou que a declividade é muito acentuada, que ultrapassa os 75% (Figura 11), ou seja, são montanhas escarpadas. Isso ocorre devido à exposição das rochas existentes na área de estudo, que por serem mais resistentes aos efeitos intempéricos e erosivos, mantém a topografia mais inclinada. Esta situação pode estar relacionada ao contexto tectônico, onde as declividades que tenham valores acima dos 75% estejam representando um plano de falha geológica existente na região.

Figura 11 – Perfil 1, validação de declividade (Coordenadas da foto: 443.349 mE / 9.338.544 mN).

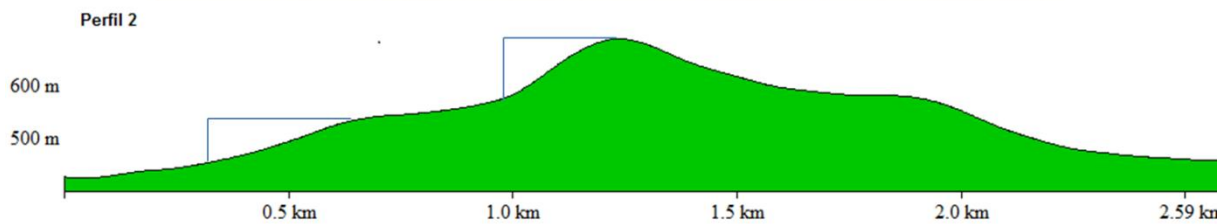


Fonte: Autor.

No Perfil 2 de validação, localizado no setor Leste da Serra do Maia, indica que os declives aumentam em direção ao topo, dando um efeito de degrau (Figura 12). Nesse perfil os declives variam de 8% até 75%, podendo ser confirmado também pela inclinação da rampa mostrada na foto (Figura 12). Os declives mais fortes estão situados próximo do topo da serra, que provavelmente esteja relacionado ao contexto geológico, onde o topo é sustentado por rochas mais resistentes às ações intempéricas, vistas pelas cristas do relevo montanhoso.



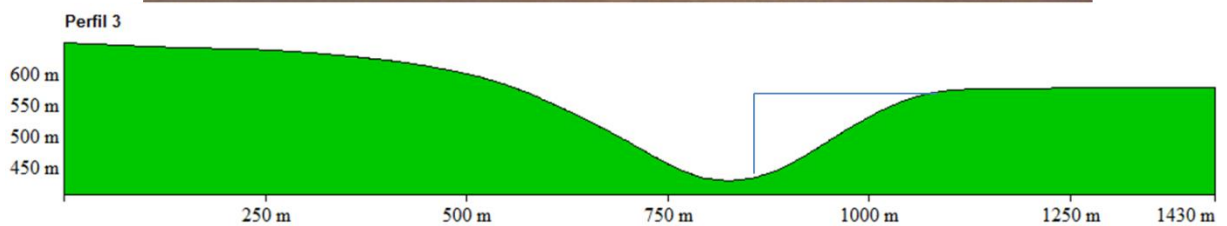
Figura 12 – Perfil 2, validação de declividade (Coordenadas da foto: 442.158 mE / 9.334.911 mN).



Fonte: Autor.

O Perfil 3 foi traçado na porção mais ao Sul da Serra do Flamengo, mais especificamente no boqueirão do Riacho Sabonete, onde formou um vale profundo escavado pela competência das águas desse riacho, cujas vertentes são sustentadas por rochas quartzíticas (Figura 13). Geologicamente esta quebra de relevo perpendicular a crista da serra pode estar relacionada a uma série de falhamentos que cortam discordantemente o *trend* principal de direcionamento das serras na região. O local apresenta declive acima de 75%, segundo o Mapa de Declividade (Figura 10), onde tanto o desenho do perfil quanto a fotografia tirada mostraram a existência de uma rampa íngreme na área avaliada (Figura 13).

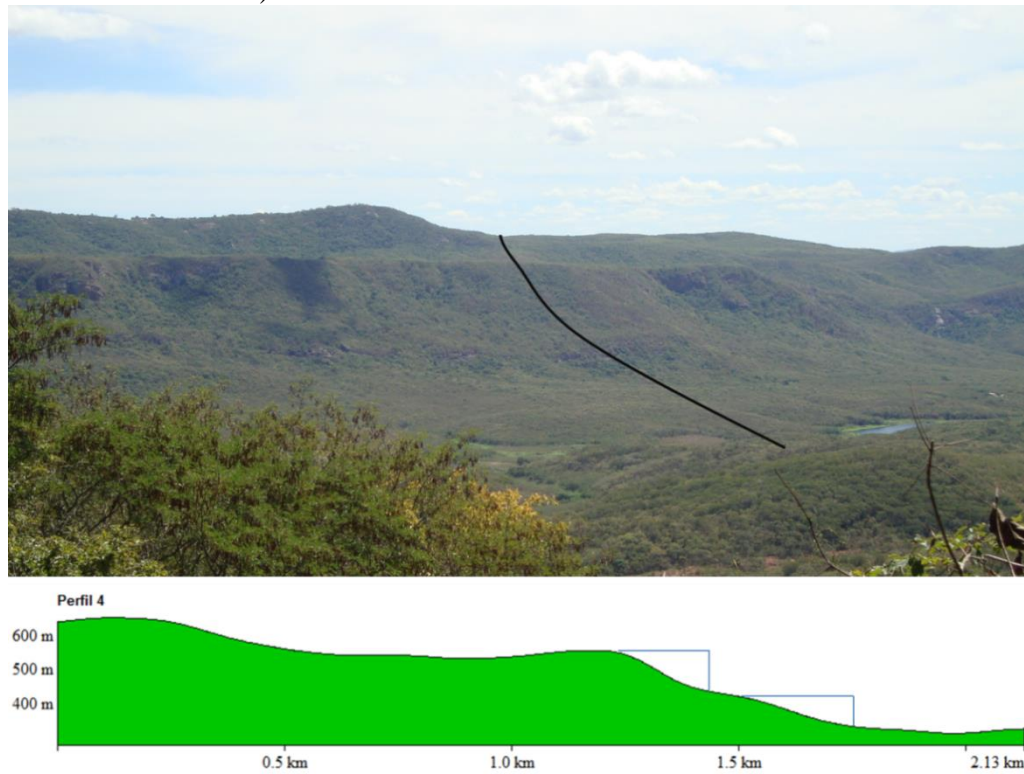
Figura 13 – Perfil 3, validação de declividade (Coordenadas da foto: 426.380 mE / 9.330.644 mN).



Fonte: Autor.

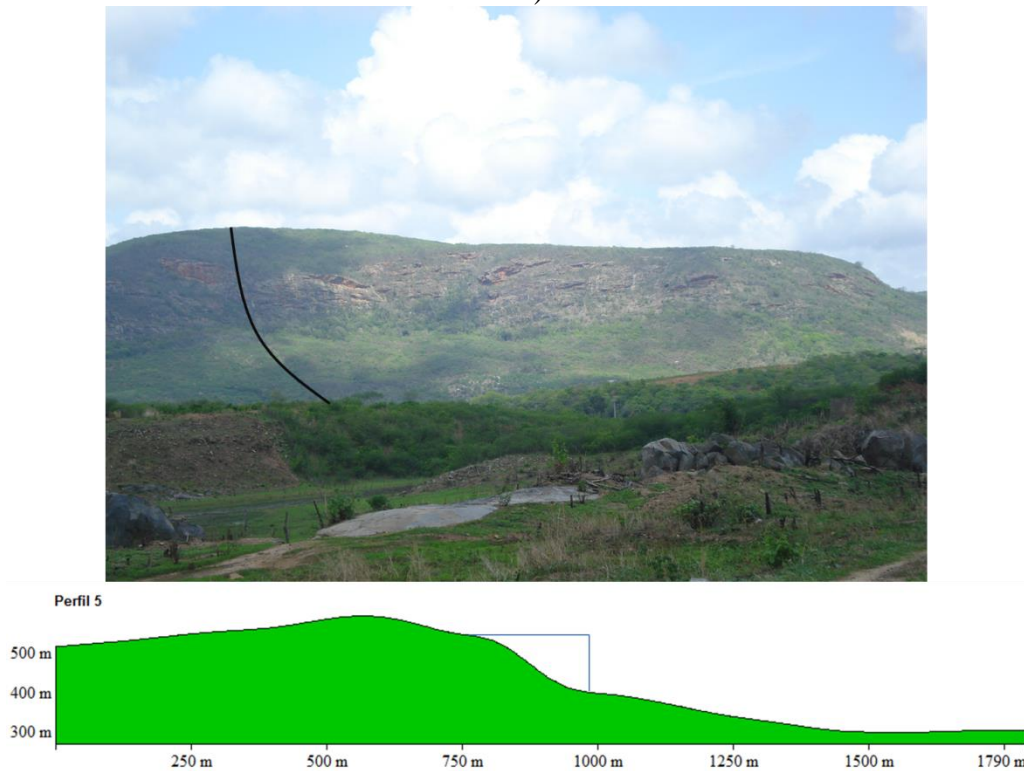
A porção Leste da Serra de São Miguel corresponde o setor da área de estudo que apresenta a maior quantidade de declives acima de 75%, a área mais escarpada de toda área de estudo. Diante disso foram traçados dois perfis para que mostrassem mais claramente o grau de inclinação acentuado visto no Mapa de Declividade (Figura 10). O Perfil 4, situado mais ao Sul da Serra de São Miguel, apesar de apresentar uma rampa curta com declives acentuados, possui uma boa cobertura vegetal na vertente (Figura 14). Já o Perfil 5 apresentou o declive mais acentuado da área de estudo, representado por um grande paredão, que corresponde o afloramento da rocha existente na região, como pode ser vista na foto tirada (Figura 15), onde forma de relevo é representado por uma rampa curta e íngreme.

Figura 14 – Perfil 4, validação de declividade (Coordenadas da foto: 441.836 mE / 9.340.071 mN).



Fonte: Autor.

Figura 15 – Perfil 5, validação de declividade (Coordenadas da foto: 441.530 mE / 9.344.788 mN).



Fonte: Autor.

### 5.1.2 – Orientação de Vertentes

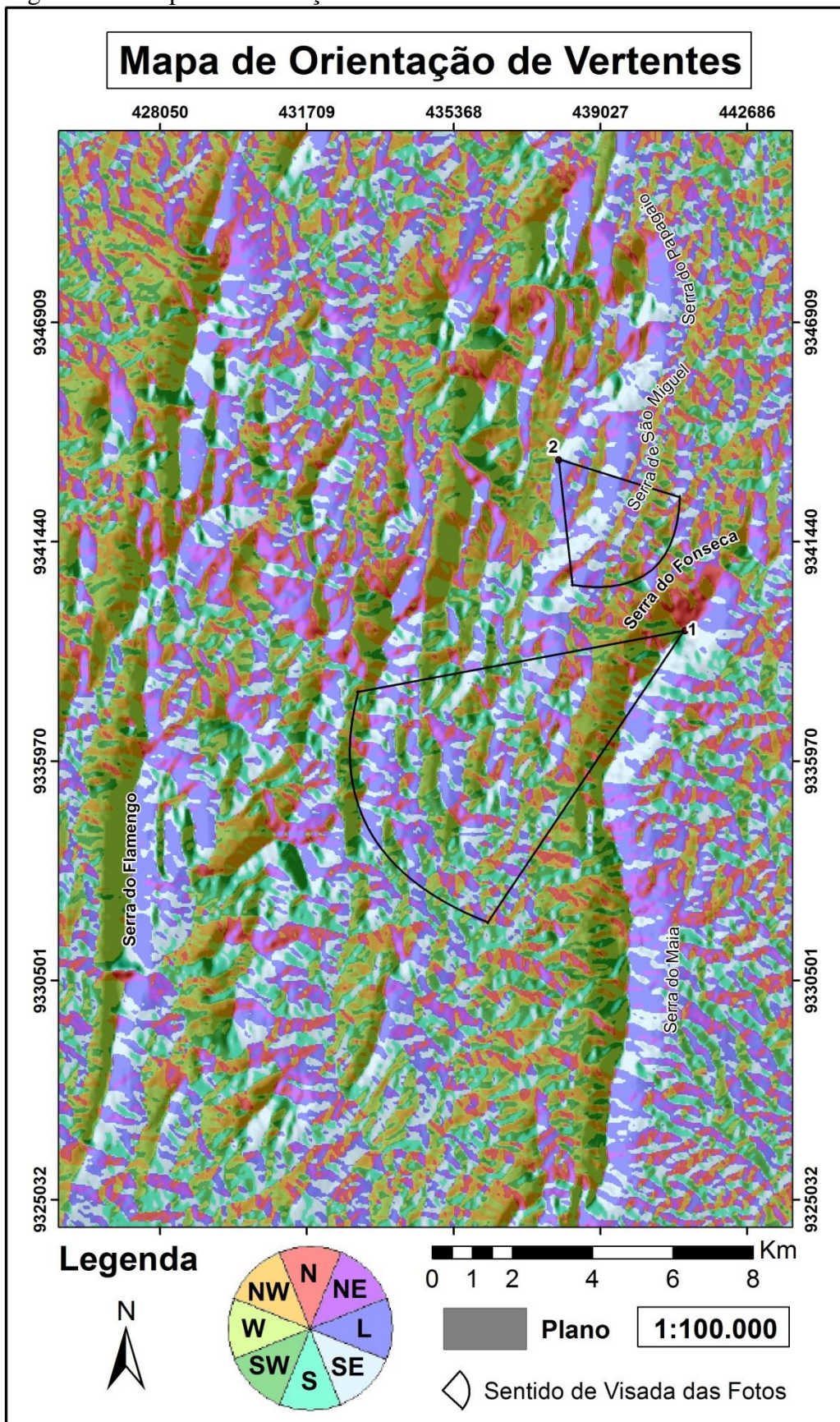
O Mapa de Orientação de Vertentes (Figura 16) foi elaborado para estabelecer o entendimento da direção das linhas de fluxo, ou seja, determina a direção de escoamento de água ou de sedimento e assim prever a direção de deslocamento de movimentos gravitacionais. Então, com base nisso o produto de orientação de vertentes, gerado a partir do MDE do Topodata, mostrou que há uma coerência entre as orientações mostradas no mapa com as que foram vistas e registradas em campo por meio das fotografias tiradas.

Como o *trend* principal do direcionamento das serras do Maciço Central do Ceará seguem uma disposição quase que Norte e Sul, as suas vertentes apresentaram em sua grande maioria orientações Leste e Oeste (Figura 16). Existem outras direções das orientações das vertentes, mas que são secundárias. O levantamento de campo foi feito justamente para validar as informações vistas no Mapa de Orientação de Vertentes. Para isso foram realizadas análises visuais feitas nos pontos mais elevados para se ter uma melhor visão panorâmica e se fazer os melhores registros fotográficos.

Logo, o levantamento foi pontual e por meio do uso de uma bússola foi possível determinar as orientações das vertentes. O primeiro ponto observado foi feito no topo da Serra do Fonseca, com vistas ao fundo a Serra do Flamengo, que possui uma orientação preferencial Norte e Sul (Figura 17). Nela foi possível comprovar que a encosta da serra suas vertentes seguem perpendicularmente a sua direção principal, ou seja, no lado visualizado da Serra do Flamengo as vertentes possuem uma orientação para Leste (Figura 17).

No outro ponto observado, situado no topo da Serra de São Miguel, permitiu visualizar a vertente Oeste da Serra do Fonseca na sua porção mais ao Norte da área, onde mostrou claramente suas orientações, em sua maior parte para Oeste, sendo algumas secundárias estando para Norte, isso ocorre devido as terminações do seguimento da serra, como pode-se observar na Figura 18.

Figura 16 – Mapa de Orientação de Vertentes.



Fonte: Autor, elaborado a partir do MDE do Topodata.

Figura 17 – Ponto 1, Validação das orientações das vertentes da parte central da área de estudos, registro feito a partir do topo da Serra do Fonseca (Coordenadas da foto: 441.136 mE / 9.339.222 mN).



Fonte: Autor.

Figura 18 – Ponto 2, Validação das Orientações das vertentes da porção mais ao norte da serra do Flamengo, registro feito a partir do topo da serra de São Miguel (Coordenadas da foto: 437.990 mE / 9.343.484 mN).



Fonte: Autor.

### 5.1.3 – Curvatura Vertical

A análise que é feita para curvatura vertical refere-se ao caráter côncavo, convexo ou retilíneo do terreno quando analisado em perfil, refletindo a relação geologia/geomorfologia. Para confecção do Mapa de Curvatura Vertical foram utilizados os dados do MDE do Topodata (Figura 19).

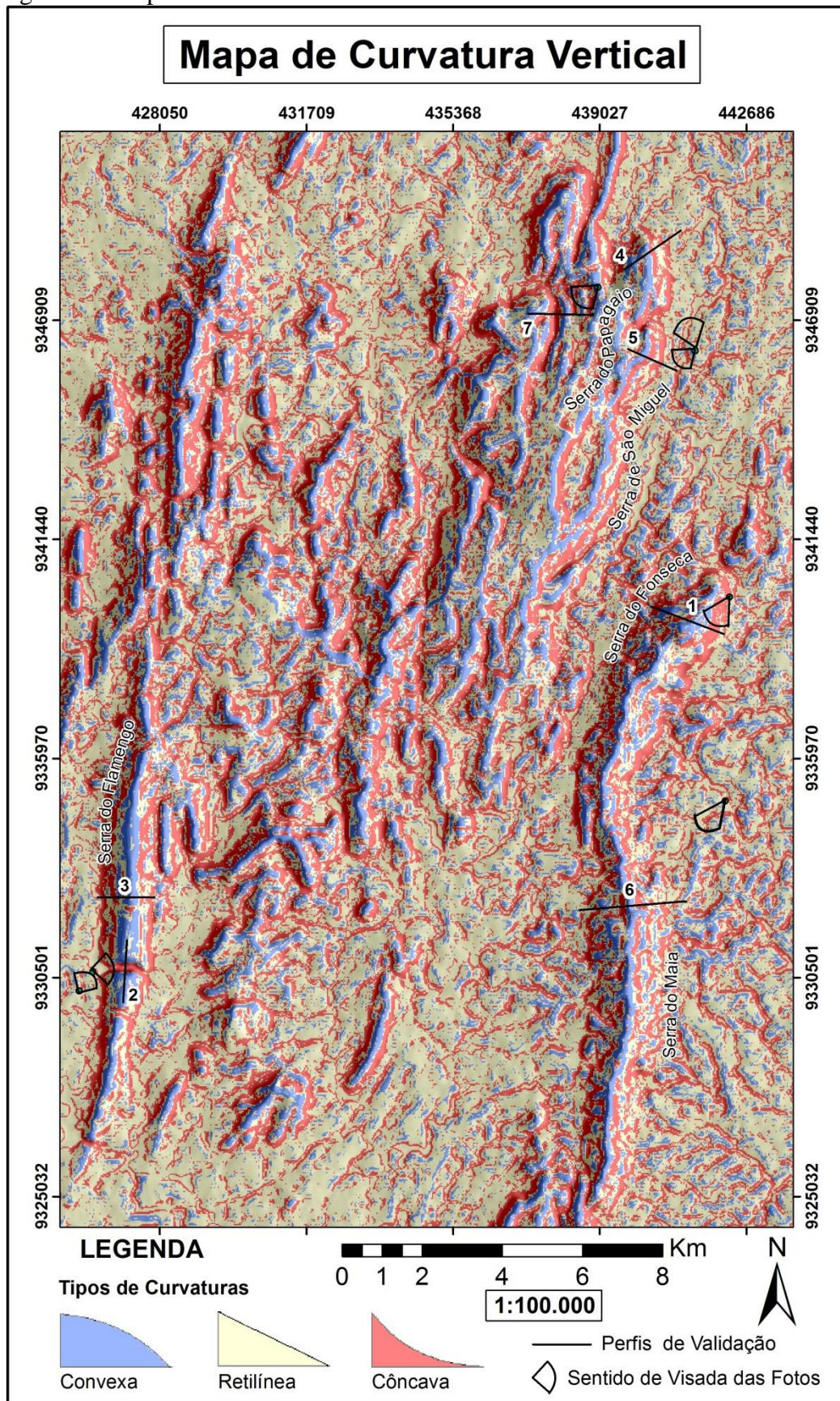
Analisando a área como um todo por meio do Mapa de Curvatura Vertical verificou-se que grande parte dela é caracterizada com curvaturas mais retilíneas, que representam as áreas mais rebaixadas topograficamente (Figura 10). As curvaturas côncavas e convexas estão situadas nas áreas mais elevadas da região pesquisada, sendo que as de caráter côncava situam-se em geral nos sopés das serras e as de caráter convexas estão localizadas nos topos das serras, representando as suas cristas topográficas (Figura 19).

Pela contextualização geológica, a área de estudo possui um forte controle estrutural com a existência de grandes zonas de cisalhamento, de cisalhamentos secundários e de falhas de empurrão, o que condicionou uma morfologia fortemente irregular na região. Associado a isso, partes das cristas mais elevadas estão relacionadas com a litologia resistente, que condicionou um maior grau de estabilidade geomorfológica devido a maior resistência dos minerais formadores das rochas existentes na área pesquisada, como por exemplo, o quartzito. Isso possibilita a sustentação dos altos topográficos.

Para validar as curvaturas verticais das serras do Maciço Central do Ceará adquiridas pelo modelamento topográfico digital do produto Topodata, foi adotada a utilização de perfis topográficos e uso de registros fotográficos com pontos de coordenadas e de observação das informações vistas em campo.

Com base nesta proposta de validação pôde-se comprovar que os tipos de curvaturas interpretados no Mapa de Curvatura Vertical condiziam com a realidade daquelas constatadas durante o trabalho de campo. Para isso foram traçados sete perfis em diferentes setores do maciço estudado (Figura 19). Estes perfis não coincidem com os demais feitos anteriormente, porque foram escolhidos os mais representativos para serem mostrados, tanto do MDE quanto que existem de fato na área pesquisada.

Figura 19: Mapa de Curvatura Vertical.



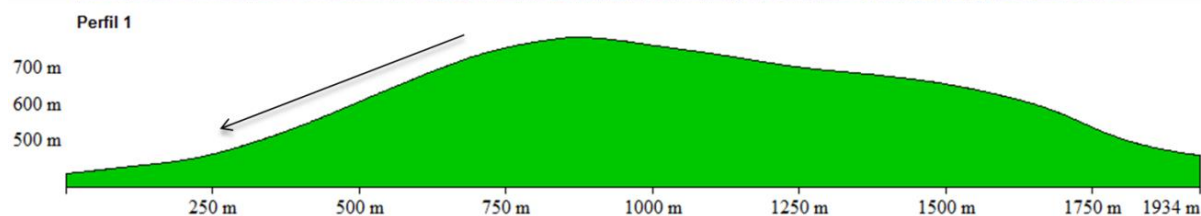
Fonte: Autor, elaborado a partir do MDE Topodata.



O Perfil 1 foi traçado de Leste para Oeste, próximo a localidade do sítio Balão, no extremo Norte da Serra do Fonseca, onde foi realizado a visita por trilha dos principais pontos da vertente até o topo, durante esse percurso foram realizados a checagem e o registro fotográfico dos tipos de curvaturas do terreno bem como a análise dos processos geomorfológicos associados aos tipos de forma de encosta.

Como pode ser observado na foto da Figura 20, a encosta da Serra do Fonseca possui formato convexo no topo e côncavo no sopé, no entanto em algumas partes da vertente, existem locais onde a curvatura é retilínea, principalmente quando a topográfica é mais arrasada (Figura 20).

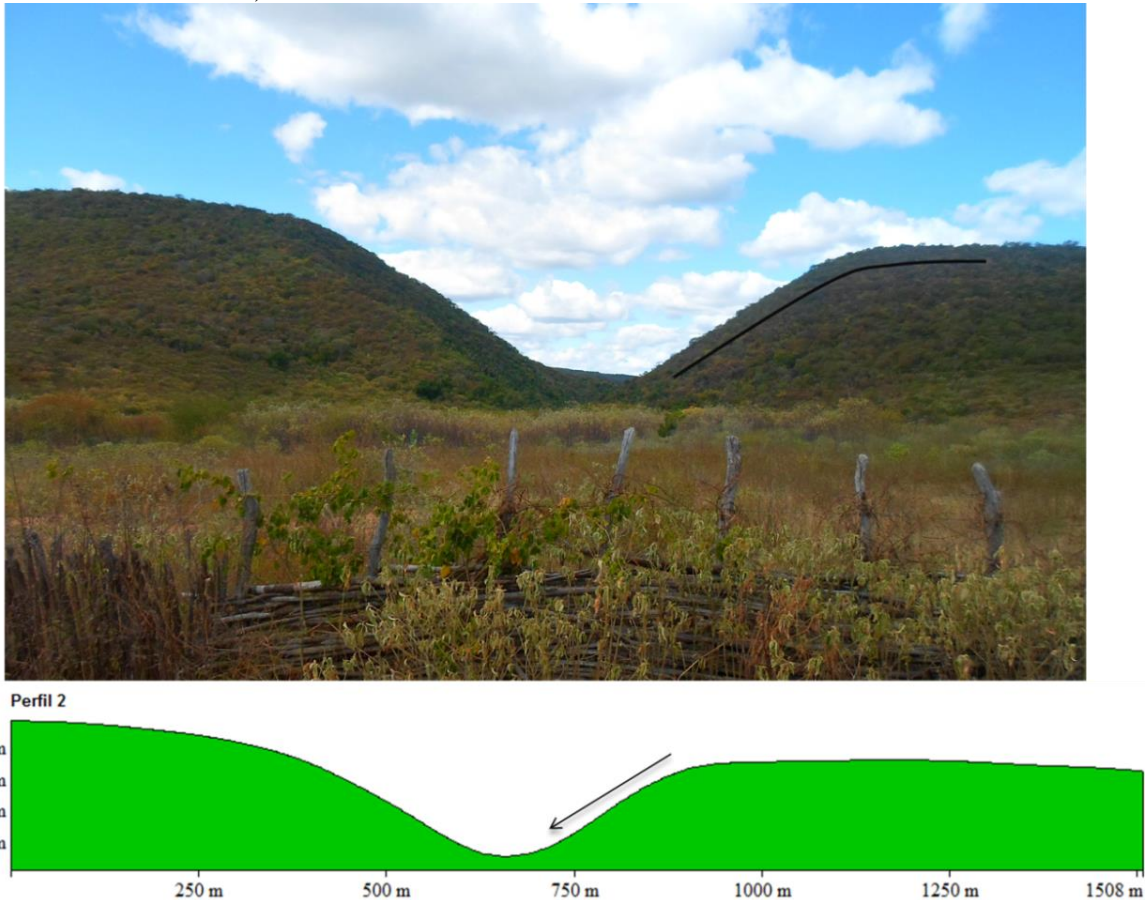
Figura 20 – Perfil 1, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 442.265 mE / 9.340.000 mN).



Fonte: Autor.

O Perfil 2 de validação foi feito no boqueirão do Riacho Sabonete, localizado na Serra do Flamengo, que apresentou um formato convexo, quase retilíneo, nas duas margens do vale, mostrando que o entalhamento pode ser abrupto e que o processo de suavização do relevo ocorre lentamente ao longo do tempo de escavação desse vale (Figura 21).

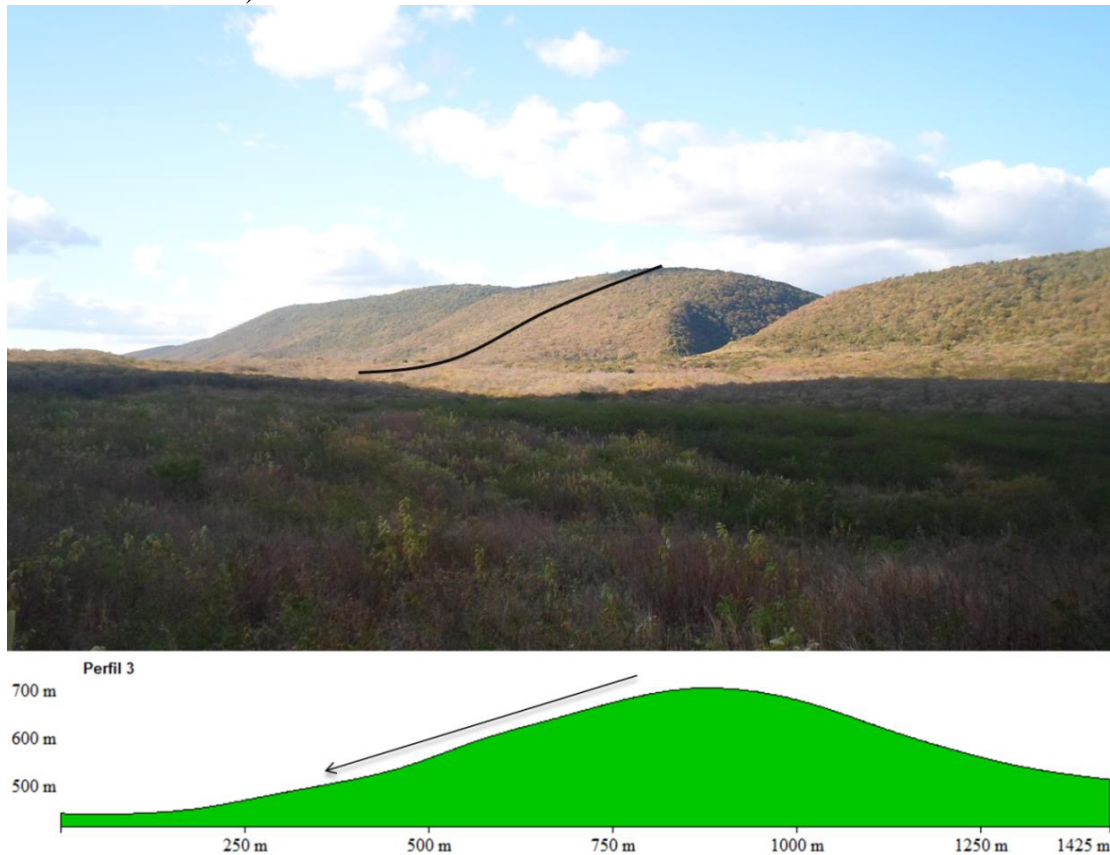
Figura 21 – Perfil 2, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 426.380 mE / 9.330.644 mN).



Fonte: Autor.

A vertente Oeste da Serra do Flamengo, representada pelo Perfil 3, mostrou um relevo suavizado, cuja curvatura vertical se deu de forma mista entre convexa no topo, retilínea ao longo da encosta e côncava na base (Figura 21). Esse padrão de formato de terreno ocorre em toda a porção Oeste da Serra do Flamengo podendo ser confirmados pelo Mapa de Curvatura Vertical (Figura 19) e durante a visita de campo. Isso se deve ao contexto tectônico do terreno, onde as zonas de falhas situam-se de forma geral na porção Leste das vertentes das serras existentes na região estudada.

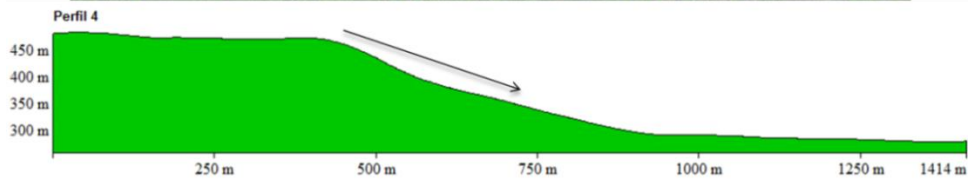
Figura 22 – Perfil 3, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 426.031 mE / 9.330.176 mN).



Fonte: Autor.

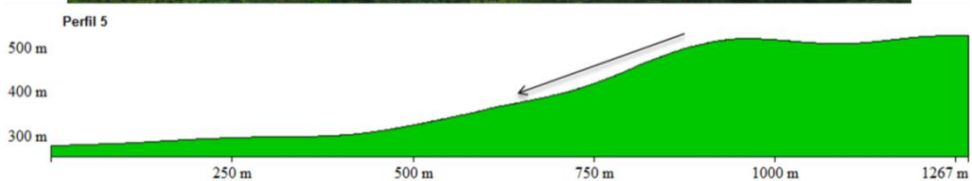
A porção Leste da Serra de São Miguel apresenta um padrão de intercalação das curvaturas das vertentes que acompanha uma sequência de côncava/retilínea/côncava/convexa, esse padrão segue uma lógica diferente daqueles apresentados nos perfis das outras serras, onde a sequência é dada entre côncava/convexa na Serra do Fonseca ou côncava/retilínea/convexa na Serra Flamengo. Os perfis 4 e 5 ilustra bem esse padrão, onde a base é côncava, o meio retilíneo e em seguida côncavo próximo ao topo, que por sua vez é convexo, esse padrão mostra claramente as altas declividades dessas encostas modeladas em rochas expostas (Figuras 23 e 24).

Figura 23 – Perfil 4, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 441.398 mE, 9.346.152 mN).



Fonte: Autor.

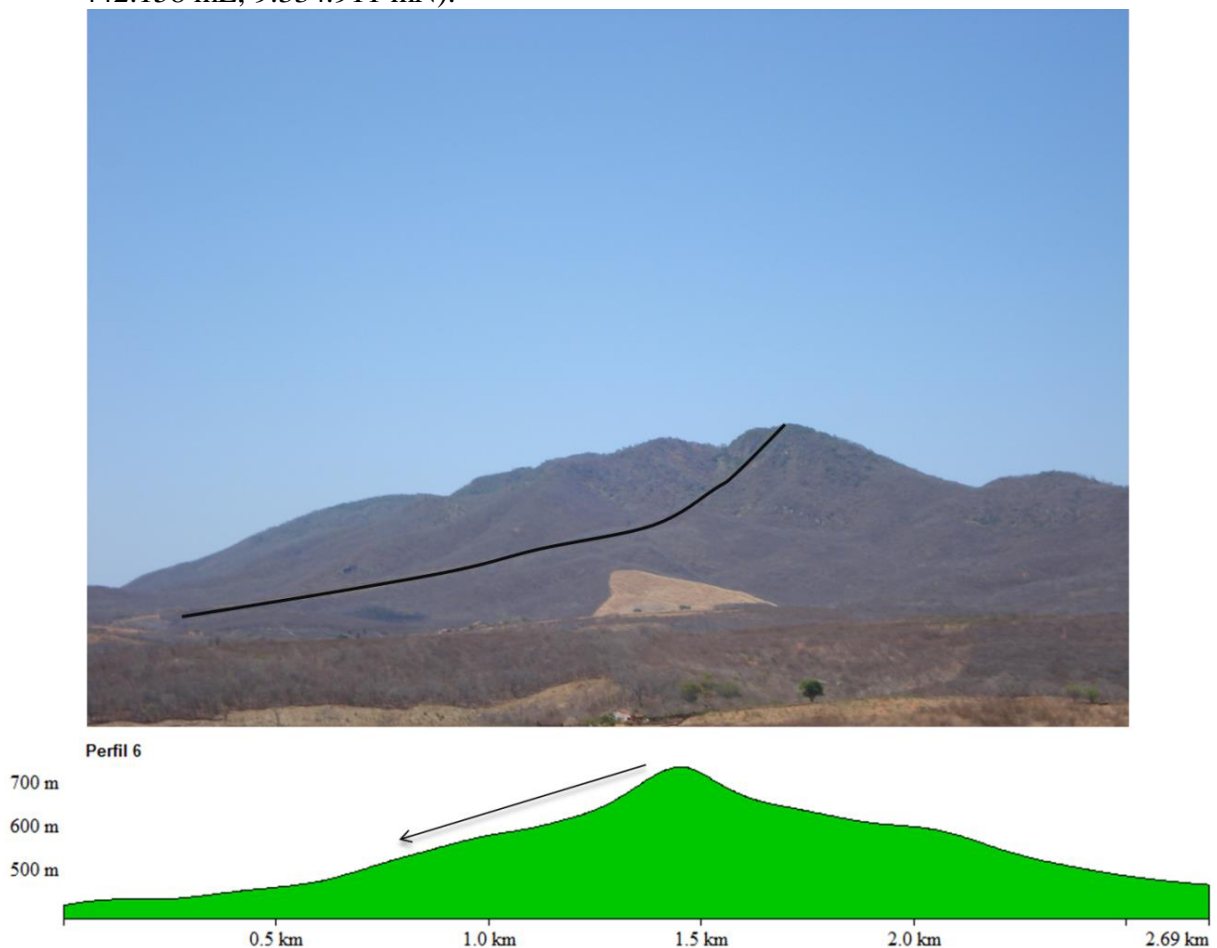
Figura 24 – Perfil 5, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 441.398 mE, 9.346.152 mN).



Fonte: Autor.

O perfil 6 foi traçado na Serra do Maia, contando a serra de Leste para Oeste. No entanto a vertente que está representada na fotografia (Figura 25) é a vertente Leste, está localizada próximo a Comunidade do Sítio solidão. A ilustração mostra que as feições do terreno cartografadas no mapa seguem um padrão parecido com aquele visto na realidade do terreno, ou seja, o topo é convexo, o meio côncavo e o sopé convexo-côncavo. A forma côncavo-convexa na base do relevo representa um festonamento bem pronunciado na paisagem, também pode ser verificado em campo que o sopé dessa serra possui um razoável depósito de sedimentos argilosos, que deslizou por gravidade das áreas mais altas da serra.

Figura 25 – Perfil 6, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 442.158 mE, 9.334.911 mN).



Fonte: Autor.

O perfil abaixo foi plotado próximo a localidade de Serrote Verde, a Sul da Serra do Papagaio e Oeste da Serra de São Miguel, nessa representação pode se ver claramente que algumas vertentes têm formatos colinares nos topos, mostrando uma forte convexidade do relevo no setor, esse fato pode estar relacionado com a quantidade de umidade do local e com

a litologia que sustentam o modelado. Esses morrinhos são separados entre si, por vales profundos, que no mapa são representados por curvaturas côncavas (Figura 26).

Figura 26 – Perfil 7, validação de curvatura vertical (Coordenadas da foto: 438.976 mE, 9.347.732 mN).



Fonte: Autor.

#### 5.1.4 – Curvatura Horizontal

A curvatura horizontal indica na paisagem padrões de divergência, convergência ou planar das linhas de fluxos. Esse tipo de curvatura é uma importante variável do escoamento superficial, pois a partir da análise da convergência e divergência apresentadas no terreno é possível prognosticar a canalização dos fluxos escavando sulcos profundos nas encostas ou a expansão da drenagem e suas possíveis consequências de alagamentos. O caráter divergente da curvatura evidencia a expansão das linhas de fluxos, que podem indicar topografia mais suave ou vales abertos, no entanto o aspecto convergente sugere um estreitamento dos

caminhos do escoamento formando vales mais fechados e a curvatura planar pode representar terrenos mais aplainados.

A validação dos tipos de curvaturas horizontais foi realizada através de pontos específicos, marcados no mapa e fotografados em campo. Esses pontos mostraram que o produto de curvatura horizontal gerado a partir do MDE Topodata possui uma boa representatividade da realidade das feições horizontais impressas no terreno. No total foram marcados quatro pontos representativos distribuídos pela área de estudo (Figura 30).

Os registros fotográficos feitos em campo provaram que os aspectos de curvaturas horizontais vistos no terreno são bem semelhantes aqueles representados no mapa (Figura 30). Nas áreas das serras as curvaturas que predominaram foram as convergentes e divergentes, no entanto em algumas vertentes das serras do Flamengo das Serras de São Miguel a curvatura planar também tem forte presença. Na Depressão Periférica a curvatura planar é predominante, mostrando a suavidade do relevo e a tendência de expansão dos fluxos nesses terrenos de topografia suave.

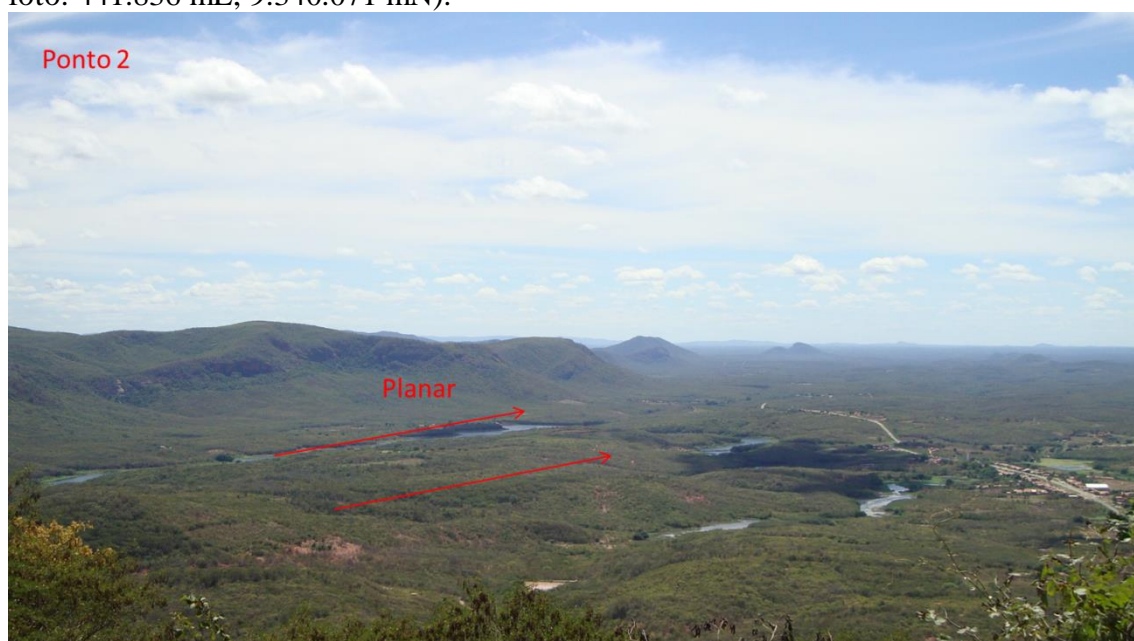
Figura 27 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente. (Coordenadas das fotos: 442.990 mE, 9.339.552 mN ).



Fonte: Autor.

O ponto 1 marcado no setor Leste da Serra do Fonseca mostrou locais de convergência intercalados com divergências, nessa vertente pôde-se perceber que os sulcos são menos frequentes conferindo a esse setor da serra um aspecto maciço, pode-se perceber também que o tipo de escoamento superficial predominante é o difuso, pois não se verifica a presença de ravinamentos mais pronunciados nessa vertente (Figura 27). A litologia do local pode ter alguma influência na morfologia empregada nessa encosta, o ponto com o sulco mais pronunciado pode estar sobre uma falha ou fratura, dado que esses tipos de estruturas oferecem fraquezas suficientes para que o escoamento superficial seja mais competente no entalhamento das encostas.

Figura 28 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente. (Coordenadas da foto: 441.836 mE, 9.340.071 mN).



Fonte: Autor.

Dois pontos marcados no mapa que bem representam a curvatura planar estão localizados na Depressão Periférica entre as serras do Fonseca e São Miguel (Figura 28) e outro na vertente Oeste da Serra do Flamengo (Figura 31). A curvatura planar como o nome já diz, é caracterizada por áreas com pouca rugosidade, ou seja, sem muita influência da erosão linear que forma entalhamentos no terreno. Nesse tipo de curvatura os fluxos escoam continuamente sem formar sulcos profundos no terreno, como pode ser visto no mapa (Figura 30), a curvatura predominante na Depressão Periférica é a planar, esse fato deve-se a uma topografia arrasada pelos processos de erosão, nesses setores os fluxos não tendem a canalizar ou divergir.



A curvatura planar é pouco comum em vertentes íngremes, sendo mais recorrentes as curvaturas convergentes e divergentes ou a intercalação dos dois tipos, no entanto a Serra do Flamengo apresenta em sua vertente Oeste esse tipo de curvatura, a figura 31 mostra que nessa encosta quase não aparecem ravinamentos ou festonamentos, formando uma superfície continua ao longo da vertente.

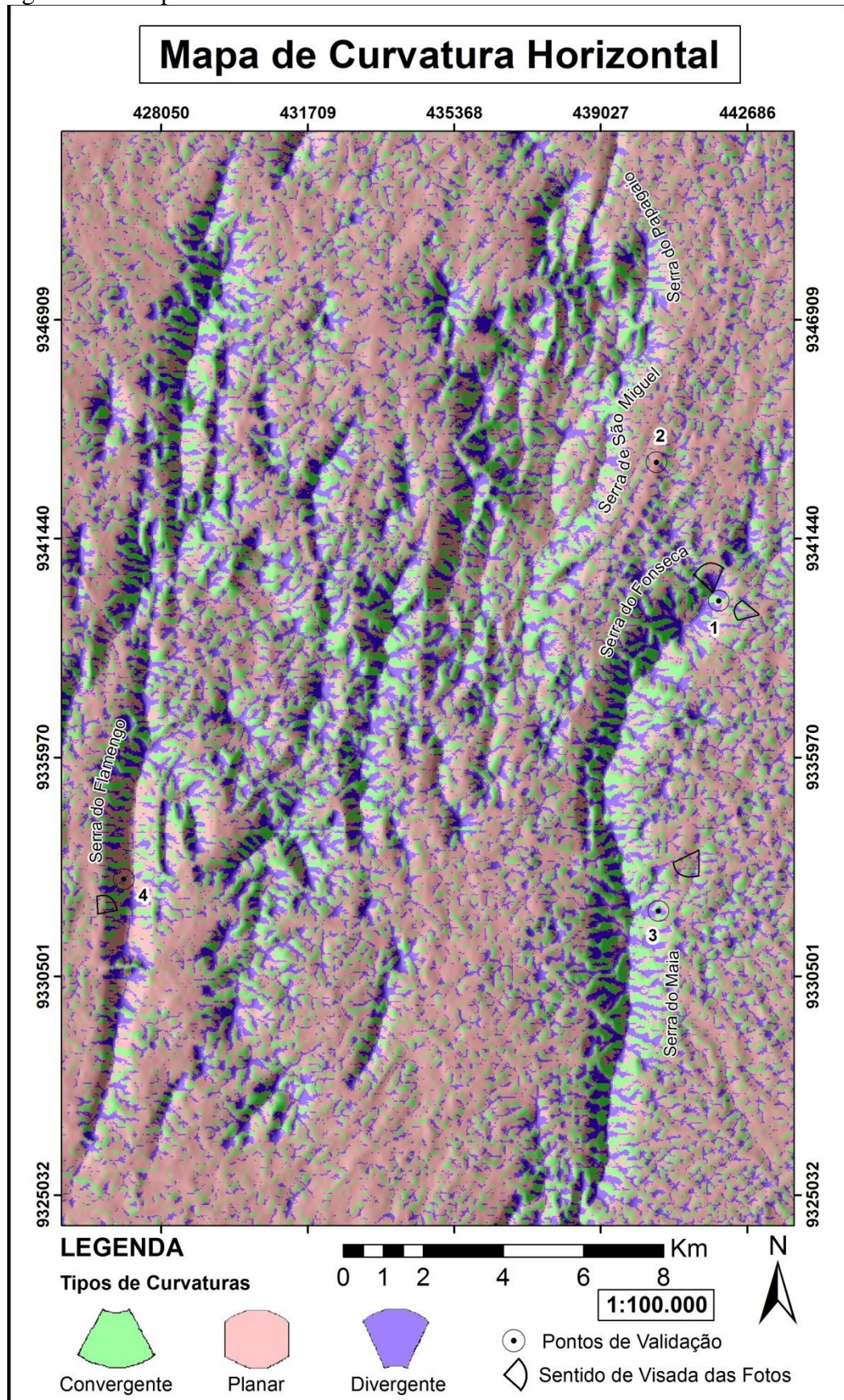
A Serra do Maia apresenta uma sequência de curvaturas divergentes intercaladas com curvaturas convergentes, formando na vertente uma série de sulcos profundos (ravinas) e talus (festões) que vão além do sopé da encosta. Os ravinamentos são resultantes da ação dos fluxos convergentes e os festonamentos representam a presença da intercalação dos dois fluxos, divergentes e convergentes. Nota-se pela indicação das setas em vermelho (Figura 29) que os fluxos que divergem de um local tendem a convergir para outros formando entalhes profundos, portanto, a lógica observada em campo indica que essa dinâmica forma uma intercalação de ravinas e festões na vertente, como pode ser vista na porção Leste da Serra do Maia (Figura 29).

Figura 29 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente. (Coordenadas da foto: ponto: 441.482 mE, 9.333.647 mN).



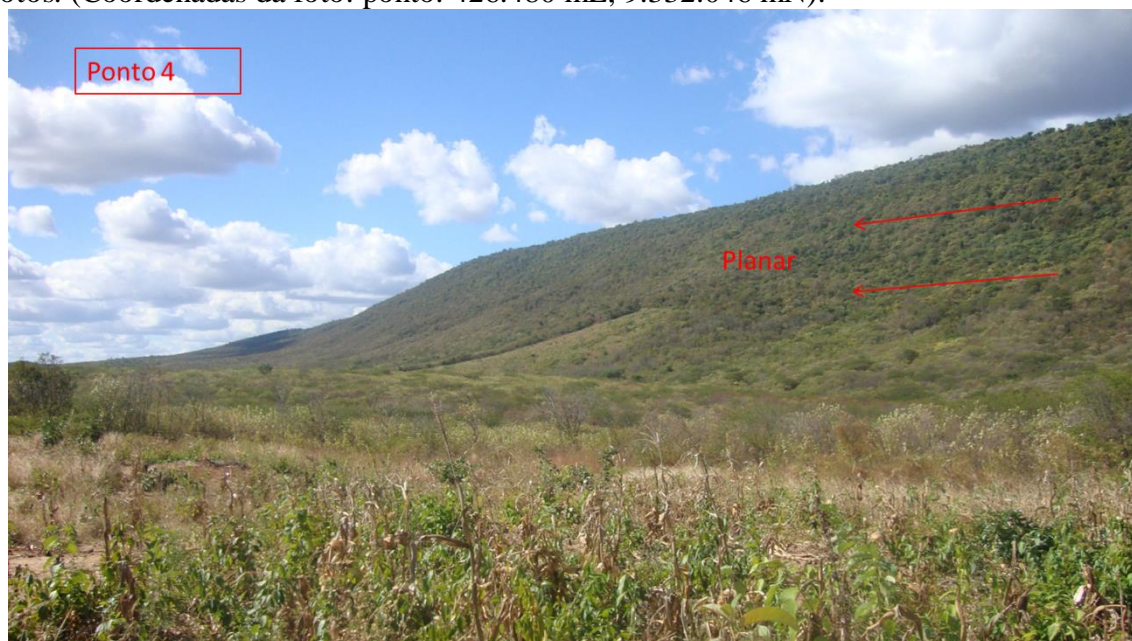
Fonte: Autor.

Figura 30 – Mapa de curvatura horizontal.



Fonte: Autor. elaborado a partir do MDE Topodata.

Figura 31 – Ponto de validação das curvaturas horizontais da vertente. Coordenadas das fotos. (Coordenadas da foto: ponto: 426.480 mE, 9.332.046 mN).



Fonte: Autor.

O objetivo principal desse capítulo foi efetuar a validação dos produtos das variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical, curvatura horizontal) gerados a partir do modelo digital de elevação Topodata. A validação das feições apresentadas nos mapas foi realizada através de registros fotográficos feitos em campo, de perfis topográficos para declividade e curvatura vertical e de pontos representativos para orientações de vertentes e curvatura horizontal. Através das análises realizadas com as ferramentas descritas anteriormente pôde-se constatar que o MDE Topodata obteve um bom desempenho para geração de mapas de variáveis morfométricas. Verificou-se ainda que as representações dos mapas corresponderam as formas encontradas no terreno.

Ficou constatado através desse trabalho que o Topodata pode ser utilizado como base para geração das variáveis de análise do terreno tais como, declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical, curvatura horizontal, hipsometria, rede de drenagem, lineamento, entre outras. Essas variáveis são importantes componentes para o estudo e avaliação dos níveis de riscos Geológicos. Portanto para gerar cartas de risco de escala regional e até local esse MDE é bem apropriado, podendo ser utilizado com segurança, logo que a confiabilidade e a qualidade dos dados gerados foram atestadas.

---

## **CAPITULO 6**

### **AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO UTILIZANDO VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS**

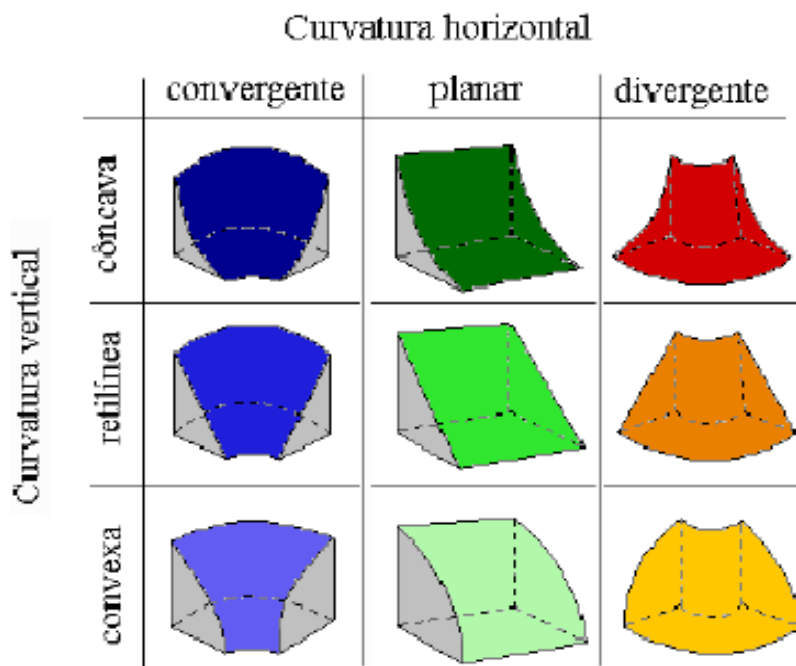
---

## 6 – AVALIAÇÃO DE RISCO GEOLÓGICO UTILIZANDO VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS

As variáveis morfométricas são importantes instrumentos de análise geomorfológica, porque a partir dessas variáveis é possível estudar os processos de evolução e as formas do terreno. A erosão é um dos processos geomorfológicos mais importantes para análise de risco, pois, além de ser responsável pelo modelamento do relevo, pode desencadear desastres naturais, como os movimentos de massa comuns em vertentes com declives acentuados.

Vários são os fatores condicionantes dos processos erosivos, entre eles estão o formato, a orientação e o grau de inclinação dos terrenos. A forma do terreno é definida a partir da associação dos tipos de curvaturas vertical e horizontal (Figura 32). Então, a morfologia do relevo pode definir o potencial de risco que um local possa ter quanto a ação erosiva. Associado a esta informação, a declividade, que determina o grau de inclinação do terreno e o nível de escoamento superficial, mais a orientação das vertentes, que define a quantidade de humidade e iluminação que as encostas irão receber ao longo do ano, corroboram na melhor análise de risco de desabamento das encostas de terrenos elevados.

Figura 32 – Esquema de combinação das curvaturas vertical horizontal para representar a morfologia do terreno.



Fonte: Valeriano (2010).

A geologia possui uma importante contribuição para que essa erosão ocorra, dado que o tipo de composição mineral do substrato rochoso e os fatores estruturais do terreno (falhas, fratura, foliações e dobras) irão definir o ponto de partida dos processos erosivos. O solo é o fator superficial mais importante para a análise de risco quanto à erosão pluvial e fluvial, pois os processos erosivos se concretizam nessa frágil estrutura exposta na superfície, que está condicionada pela morfologia do terreno, pela reologia, pela porosidade e permeabilidade, e pela quantidade de matéria orgânica que possibilita predeterminar o grau de erosão do terreno.

A vegetação e o clima são outros fatores deflagradores dos processos erosivos. A cobertura vegetal funciona como uma proteção dos solos aos fatores climáticos, como as precipitações pluviométricas. Quanto mais densa a vegetação menor será o impacto direto das gotas de chuva contra o solo. Além de que as raízes produzem sustentabilidade do solo e promovem a rápida infiltração das águas escoadas.

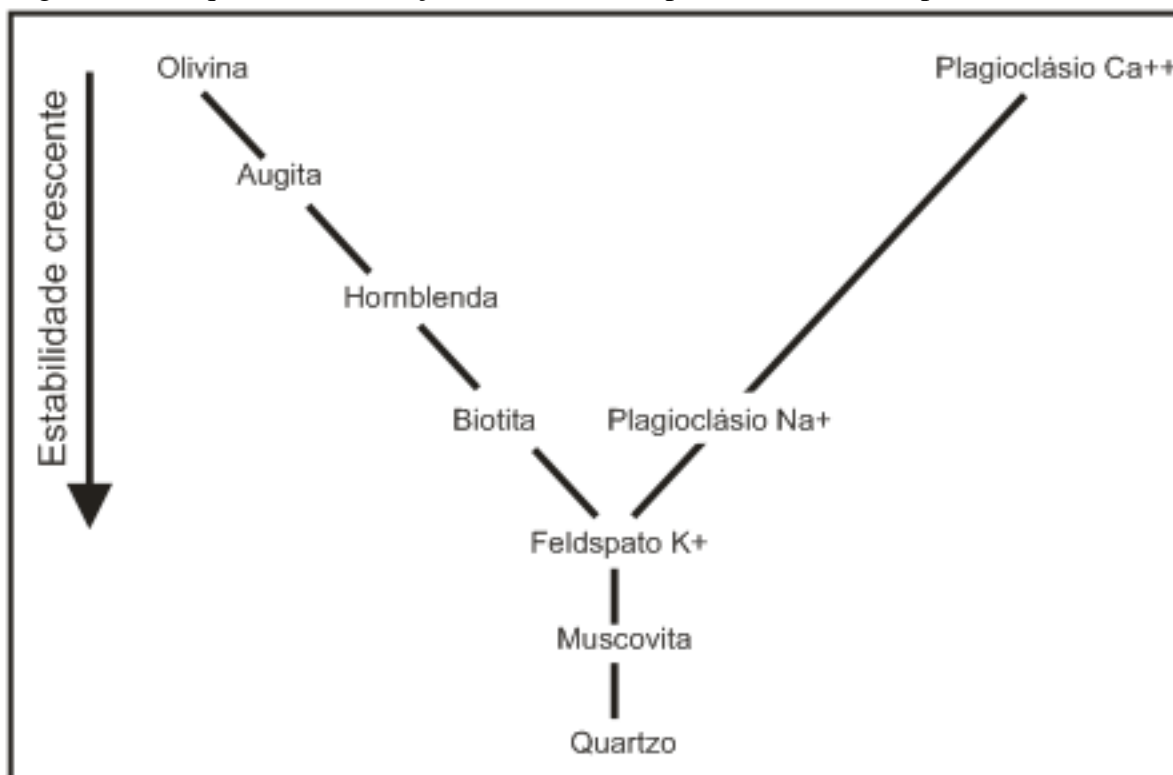
### **6.1 – A morfologia das encostas e os processos erosivos**

Os processos erosivos são assunto recorrente da ciência geomorfológica, já tendo sido abordado por diversos autores que trabalham com análise de encosta e análise de risco geológico e geotécnico. Os processos erosivos podem ser promovidos por vários agentes, como o vento, a gravidade, o gelo e a água. No caso das encostas de regiões montanhosas, o agente principal é a água. A forma como ela chega e escoar no solo é de fundamental importância para definir qual o tipo de erosão que ocorre no terreno.

Para Guerra e Marçal (2006), a Geomorfologia tem um papel fundamental para o estudo da erosão dos solos, nesse sentido os autores ainda concordam com a prerrogativa de que é pouco provável que seja possível diagnosticar com segurança as áreas susceptíveis a processos erosivos sem o conhecimento mais aprofundado da morfologia do terreno e de seus processos associados.

O intemperismo é um fator preponderante para o modelamento das vertentes, pois ele age degradando o substrato rochoso mais superficial, produzindo os materiais que serão transportados e depositados ao longo das vertentes. Para Porto (1998), a quantidade de material resultante do intemperismo depende da composição mineral das rochas (Figura 33), do clima e da morfologia do terreno.

Figura 33 – Sequência de alteração mineral e susceptibilidade ao intemperismo.



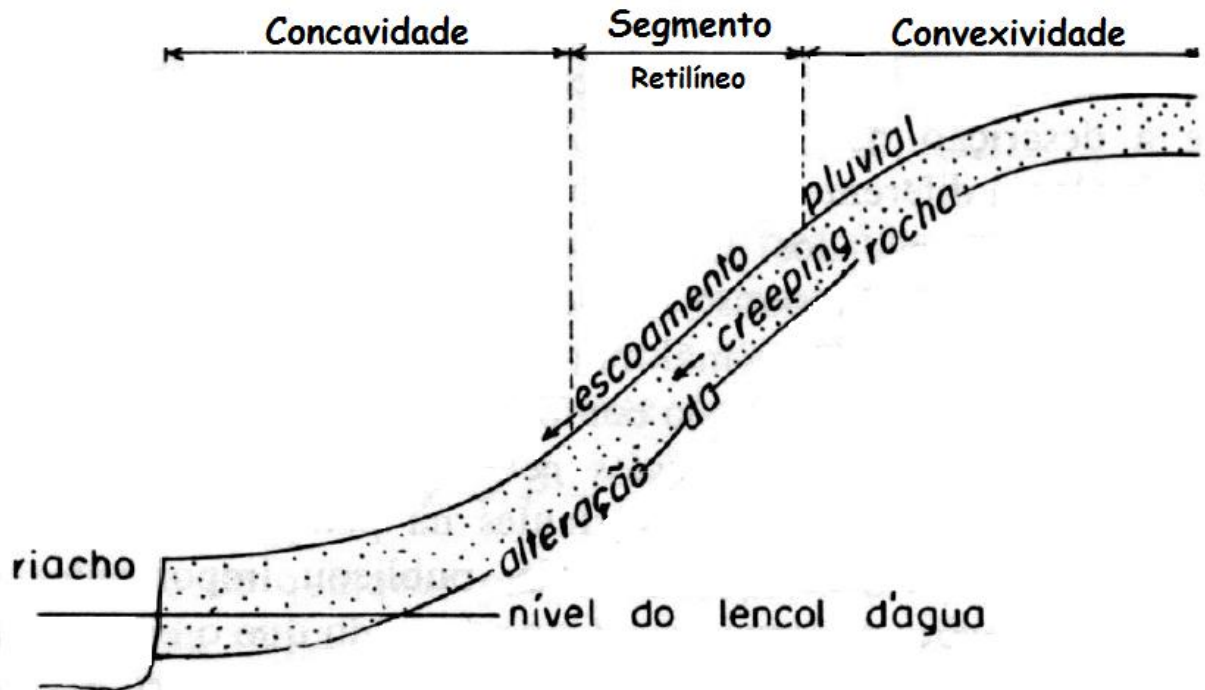
Fonte: Casseti 2005. (Adaptado de Goldich, 1938).

Os processos erosivos mais comuns nas vertentes são aqueles associados ao escoamento superficial, como a erosão pluvial e fluvial, eles são responsáveis pela evolução da vertente. Há uma estreita inter-relação entre a morfologia da vertente e o tipo de escoamento superficial, ou seja, esse tipo de erosão é condicionado pela encosta, ao mesmo tempo em que essa encosta é modelada pela erosão. Esse é um processo natural da vertente, no entanto, para Bigarela *et al.* (2003), os processos erosivos podem ser acelerados pela interferência do homem no manejo dos solos e por mudanças climáticas bruscas, causando grandes destruições.

De acordo com Christofletti (1980); Bigarela *et al.* (2003) e Ritter, Kochel, Miller (2006), o tipo de encosta possui grande influência nos processos erosivos, a análise da relação entre concavidade, convexidade, segmento retilíneo e declividade da vertente vai definir pontos e graus diferentes de susceptibilidade à erosão, bem como a definição de prováveis locais de deposição dos sedimentos. Para Derruau, (1965 *apud* Christofletti, 1980), a forma clássica de vertente “normal ou regular” é composta por um topo convexo e uma base côncava, separadas por um segmento retilíneo com declividade por volta de 25% (Figura 34). Ainda de acordo com Christofletti (1980) e Cassetti (2005), cientistas como Dalrymple, Blong e Conacher (1968) (Figura 35) propuseram um modelo hipotético de análise do perfil

de vertentes indicando quais processos geomorfológicos pode ocorrer em cada setor da encosta (detalhado na Tabela 02). Seguindo essa ideia pode-se fazer um zoneamento de risco de erosão para cada setor da encosta utilizando a associação das variáveis morfométricas.

Figura 34 – Composição da vertente “normal ou regular” de Derruau. A área pontilhada indica o manto de regolito.

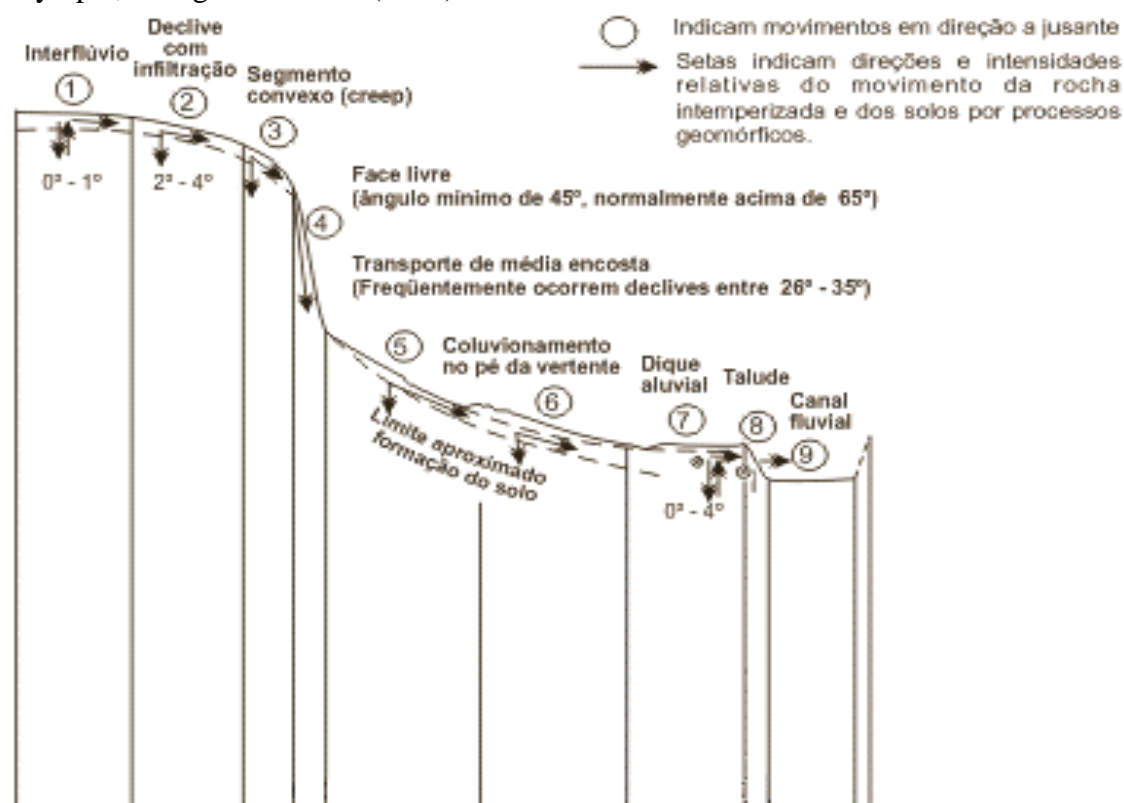


Fonte: Christofolletti (1980). Adaptado de Derruau (1965).

Segundo Cunha e Guerra (1998), o equilíbrio da encosta depende da quantidade de material intemperizado disponível, da quantidade de chuvas, da vegetação, da geologia e principalmente da morfologia do terreno e do grau de declividade das encostas. Qualquer alteração em um desses fatores pode intensificar os processos erosivos e deflagrar os movimentos de massa. Portanto, é válido dar mais credibilidade ao estudo da morfologia do terreno, identificando possíveis pontos de suscetibilidade à erosão para posteriormente fazer cruzamentos com outras variáveis, como solo, vegetação e tipos de ocupação do terreno, para poder realizar um diagnóstico mais preciso quanto ao risco que poderá ocorrer.



Figura 35 – As nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968).



Fonte: Gerrard (1992, *apud* Cassetti 2005).

Tabela 02 – Descrição das nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968) da Figura 35.

Unidades da Vertente	Processo Geomorfológico Dominantes
1 Interflúvio (0°-1°)	Processos pedogenéticos associados com movimento vertical da água superficial.
2 Declive com infiltração (2°-4°)	Eluviação mecânica e química pelo movimento lateral da água subsuperficial.
3 Declive Convexo com reptação	Reptação e formação de terracetes.
4 Escarpa (ângulo mínimo de 45°)	Desmoronamentos, deslizamentos, intemperismo químico e mecânico.
5 Declive intermediário de transporte	Transporte de material pelos movimentos coletivos do solo; formação de terracetes; ação da água superficial e subsuperficial.
6 Sopé coluvial (ângulo entre 26° e 35°)	Reposição de material pelos movimentos coletivos e escoamento superficial; formação de cones de dejeção; transporte de material; reptação; ação subsuperficial da água.
7 Declive aluvial (0°-4°)	Deposição aluvial; processos oriundos do movimento subsuperficial da água.
8 Margem de curso de água	Corrosão, deslizamento, desmoronamento.
9 Leito do curso de água	Transporte de material para jusante pela ação da água superficial; gradação periódica e corrosão.

Fonte: Adaptado de Christofolletti (1980) e Cassetti (2005).

## 6.2 – Avaliação de Risco a Erosão nas Serra da Porção Sul do Maciço Central

O trabalho teve como objetivo fazer uma análise das formas do terreno e a sua contribuição para avaliação de risco à erosão. Nessas avaliações não foi levado em consideração às análises das propriedades de erosividade e erodibilidade dos solos, bem com suas influências para o condicionamento dos processos erosivos. As discussões ficaram inicialmente no plano da morfologia e da geometria do terreno, sendo posteriormente avaliadas as demais variáveis, para poder saber o nível de contribuição de cada variável para a erosão do terreno. Em primeiro plano ficou definido os riscos naturais e em segundo plano, levando-se em conta a ação antrópica subtendida numa das variáveis aplicadas na avaliação de risco ambiental.

Para realizar a discussão a respeito da contribuição morfológica do terreno para análise de risco à erosão no Maciço Central do Ceará foram realizados vários testes com os MDE Topodata, SRTM e ASTER-GDEM, a partir dos quais, foram geradas as quatro variáveis morfométricas mais utilizadas para o estudo da morfologia do terreno. O MDE Topodata obteve os melhores resultados tanto em qualidade como na escala trabalhada, como tratado nos Capítulos 4 e 5 desta Dissertação de Mestrado. Esses dados gerados a partir do Topodata foram validados em campo, e após a validação pôde-se ter a segurança para fazer a integração desses dados para gerar primeiramente a Carta de Avaliação do Risco Morfológico Natural à Erosão do terreno (CARMONE). Com base nesta carta, pôde-se avaliar as demais variáveis para a confecção de outras duas cartas de risco.

A segunda carta integrou as variáveis morfométricas com as informações hipsométricas, geológicas, pedológicas e de vegetação para geração da Carta de Avaliação do Risco Natural à Erosão do terreno (CARNE). E a terceira e última carta integrou também as variáveis morfométricas diretamente com as informações superficiais do terreno, obtidas por meio de uma classificação supervisionada feita a partir da imagem Landsat 8, onde essas informações refletem as ações antrópicas, ou seja, as modificações na paisagem pela atividade de ocupação do homem no terreno. Com isso, foi possível gerar a Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão do terreno (CARAER).

Para fazer a identificação das áreas com maiores susceptibilidades à erosão foram feitas operações por meio de álgebra de mapas, onde foram definidos pesos e influências em porcentagem para cada variável. Os valores dos pesos de cada unidade por variável foram

definidos com base nas suas propriedades individuais com relação a probabilidade de desencadear erosão no terreno os pesos atribuídos variaram de 0 a 10, onde zero representa o menor risco e 10 o maior. Além disso, também foram definidas as influências em porcentagem (%) para cada variável integrada para geração das cartas de avaliação de risco, onde o total dessas influências para cada mapa somam 100%. Os resultados obtidos dessas operações foram apresentados sob a forma de mapas com graus de riscos divididos em cinco classes, variando entre muito baixo a muito alto.

Os resultados dos cálculos de álgebra de mapas foram apresentados em formato *raster* com classes de risco diferentes representando os cinco níveis de risco à erosão do terreno. Nos três mapas os intervalos das classes estão apresentados com valores diferentes, no entanto para normalizar os dados e minimizar a variância dentro das classes foi realizada uma operação estatística por meio de quebra natural dos intervalos, onde ficou definido que esses intervalos seriam baseados na média aritmética de cada intervalo dos três mapas. Após o cálculo dessa média pôde-se definir cinco intervalos igual para os três mapas (Tabela 03). As definições dos mesmos intervalos para as três cartas, permitiu que as classes de risco tivessem assim as probabilidades estimadas de forma semelhante, possibilitando nesse caso uma melhor avaliação e uma melhor escolha de quais cartas poderia ser mais adequada a análise de risco da Porção Sul do Maciço Central.

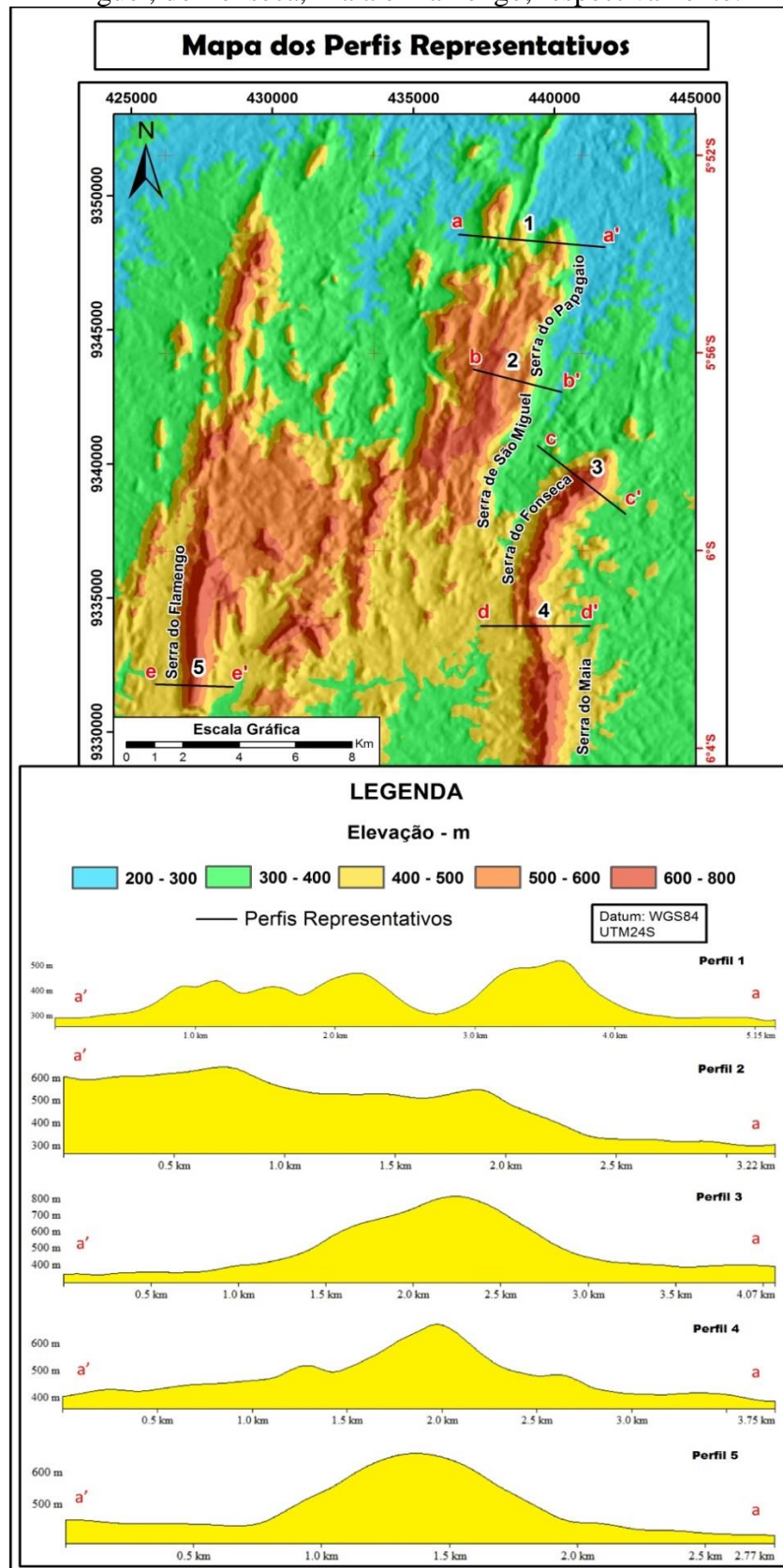
Tabela 03 – Tabela dos valores estabelecidos para definir o intervalo classes na definição dos níveis de riscos para as figuras 38, 39, 40.

<b>VALORES ESTABELECIDOS PARA AS CLASSES DOS NÍVEIS DE RISCOS</b>	
<b>Nível de Risco</b>	<b>Valores</b>
Muito Baixo	0 – 3,97
Baixo	3,98 – 4,72
Médio	4,73 – 5,27
Alto	5,28 – 6,31
Muito Alto	6,32 – 10

Fonte: Autor.

Para melhor avaliar os riscos à erosão do terreno foram elaborados cinco perfis topográficos que pudessem representar as análises feitas. A escolha dos perfis foi com base nos que apresentaram melhor representatividades para todas variáveis morfométricas vistas em campo e que pudessem cobrir toda área estudada (Figura 36).

Figura 36 – Mapas dos perfis representativos das encostas das serras do Papagaio, São Miguel, do Fonseca, Maia e Flamengo, respectivamente.



Fonte: Autor.

### . 6.2.1 – Carta de Avaliação do Risco Morfológico Natural à Erosão (CARMONE)

Na avaliação do risco morfológico natural à erosão foram utilizadas apenas as informações das variáveis morfométricas obtidas do MDE Topodata, onde a variável da declividade do terreno obteve a maior influência (em %) entre as demais no cálculo efetuado (Tabela 04), pois a declividade determina o nível de inclinação do terreno, definindo assim o grau de erosão que possa ocorrer no terreno, determinados pelos processos geomorfológicos que ocorrem na vertente. A menor influência colocada no cálculo feito foi atribuída a orientação de vertente, nesse caso o sentido para onde as vertentes estão orientadas não possui muita importância, no entanto se o cálculo envolvesse quantidade e direção das precipitações pluviométricas, esta variável teria uma influência maior na operação final.

Tabela 04 – Tabela das influências (%) e dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular o risco de erosão baseando-se na morfologia do terreno (Figura 37).

<b>DECLIVIDADE</b>	
<b>Influência (35%)</b>	<b>Pesos</b>
0 – 3%	0
3 – 8%	2
8 – 20%	4
20 – 45%	6
45 – 75%	8
+ 75%	10

<b>ORIENTAÇÃO DE VERTENTES</b>	
<b>Influência (15%)</b>	<b>Pesos</b>
Noroeste	1
Oeste/Norte	2
Sudoeste	4
Nordeste	5
Sudeste	7
Sul	8
Leste	10

<b>CURVATURA VERTICAL</b>	
<b>Influência (30%)</b>	<b>Pesos</b>
Convexa	3
Retilínea	6
Côncava	9

<b>CURVATURA HORIZONTAL</b>	
<b>Influência (20%)</b>	<b>Pesos</b>
Divergente	3
Planar	6
Convergente	9

Fonte: Autor.

A morfologia do terreno é o indicador natural mais importante com relação ao risco à erosão, pois ela define os padrões e os tipos de erosão que podem ocorrer no terreno, principalmente em encostas íngremes, onde a erosão pode se dar de forma suave ou catastrófica, com os movimentos de massas mais violentos, como os deslizamentos, corridas de lama e queda de blocos, que por sua vez também dependem de outros fatores como a vegetação, a quantidade de água envolvida e o tipo de material envolvendo essa vertente, como o tipo de solo que é composto. No entanto, a inclinação da vertente ainda é o fator mais importante para definição do grau de risco natural à erosão. Nesse sentido a Carta de Avaliação do Risco Morfológico Natural à Erosão (CARMONE), confeccionada utilizando como base a inclinação e morfologia do terreno.

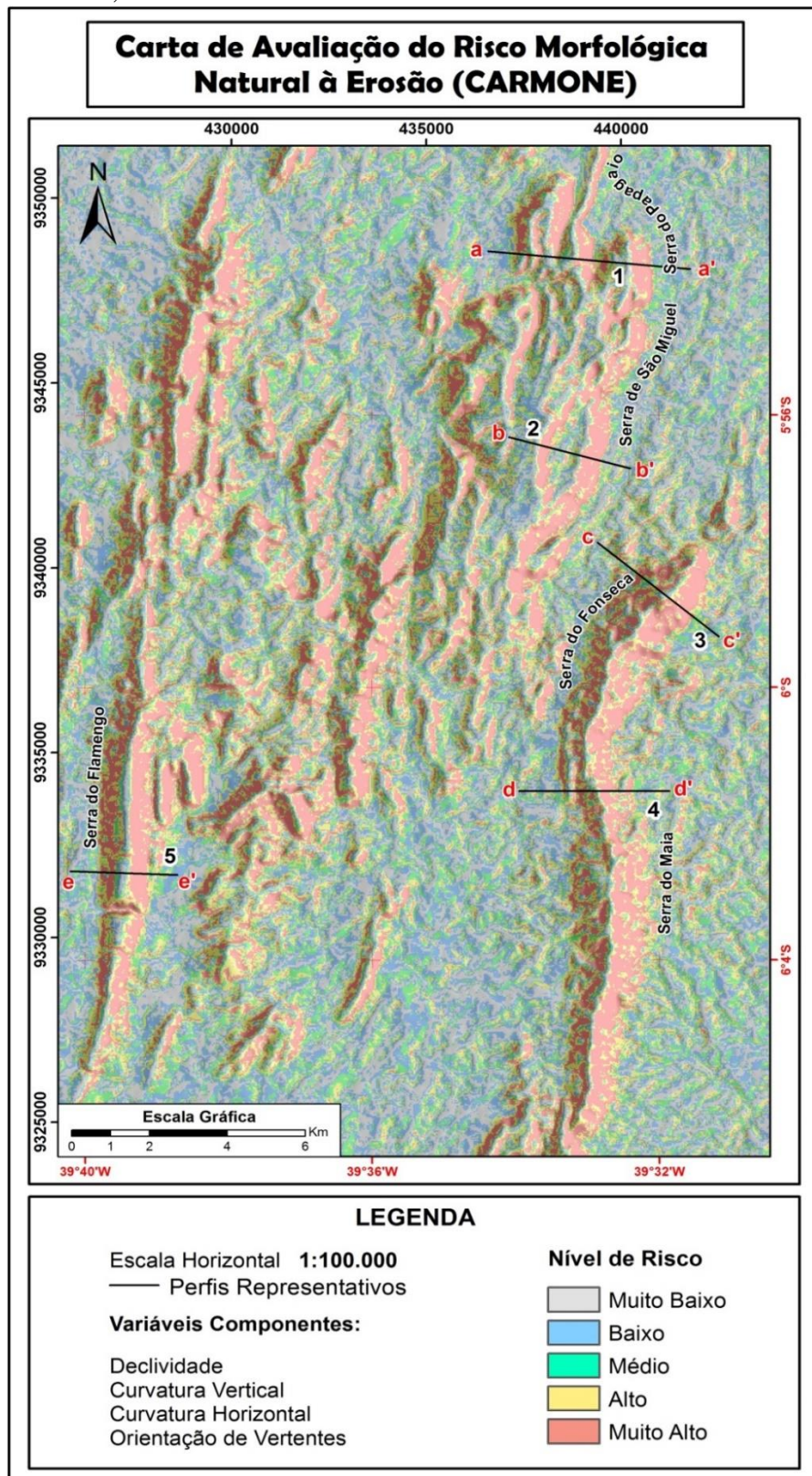
Logo, a fórmula matemática para geração da carta foi a seguinte:

$$CARMONE = (declividade*0,35) + (curvatura\ vertical*0,30) + (curvatura\ horizontal*0,20) + (orientação\ de\ vertente*0,15)$$

De modo geral, a CARMONE apresentou níveis de riscos elevados na maioria das vertentes e níveis baixos nos topos, nos sopés e na Depressão Periférica (Figura 37). Os níveis de risco obedeceram à lógica da declividade e dos tipos de curvatura vertical. Os mapas indicaram que os locais onde o terreno ofereceu os maiores riscos à erosão estão situados nas encostas das serras, principalmente na vertente Leste da Serra do Fonseca, representada no Perfil 3 c-c' (Figura 37). Esse perfil apresentou vertentes convexa/retilínea/côncava com declividade muito elevada (Perfil 3 c-c', Figura 36), que são fatores preponderantes para elevar o grau de risco à erosão neste setor da área estudada.

Alguns setores das encostas da Serra do Maia apresentaram riscos de nível moderado, principalmente no setor Oeste, contrapondo com os riscos elevados na maior parte do setor Leste e nos locais próximos ao topo, onde apresentaram altas declividades e curvaturas retilíneas (Perfil 4 d-d', Figura 36). A Serra do Flamengo mostrou uma área de risco baixo no seu topo, no entanto nas vertentes, principalmente nas encostas Leste essa serra apresentaram risco muito alto como mostrou Perfil 5 e-e' (Figura 36), os prováveis motivos pelo qual possa ter ocorrido essa peculiaridade no de risco pode ser atribuído pelo fato do cume possuir uma área considerável de relevo plano, já as vertentes principalmente a Leste apresentaram declives acentuados dispostos ao longo das superfícies retilíneas, as quais estão presentes em quase toda área nas encostas desta serra.

Figura 37 – Mapa de avaliação de risco a erosão baseado na morfologia do terreno dada pelas variáveis morfométricas, declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal.



Fonte: Autor.

O mapa indicou que nas serras do Papagaio (Perfil 1 a-a', Figura 36) e de São Miguel (Perfil 2 b-b', Figura 36) as encostas foram avaliadas com riscos considerados altos e muito alto, porém nos topos dessas serras a topografia é mais suave e apresentaram riscos que variam de médio a baixo grau quanto ao risco à erosão. Essas serras possuem ainda uma quantidade razoável de área topograficamente elevada, onde a extensão de terra é marcada por vales e interflúvios com declives suaves. Portanto, se for considerar a morfologia do terreno, o risco de ocorrer uma erosão mais severa nesse setor seria de médio ou baixo, como ficou confirmado na CARMONE (Figura 37).

### 6.2.2 – Carta de Avaliação do Risco Natural à Erosão (CARNE)

Para fazer a análise do risco natural à erosão foram realizados vários testes utilizando nove variáveis (declividade, orientação de vertente, curvatura vertical, curvatura horizontal, hipsometria, densidade de lineamentos, geologia, vegetação e solos) com pesos e influências distintos (Tabela 05), esses testes resultaram em um arquivo *raster* com as informações de graus de riscos distintos.

A fórmula matemática para geração da carta foi a seguinte:

$$CARNE = (declividade*0,17) + (curvatura\ vertical*0,15) + (curvatura\ horizontal*0,09) + (orientação\ de\ vertente*0,05) + (hipsometria*0,07) + (vegetação*0,12) + (solo*0,14) + (densidade\ de\ lineamentos*0,11) + (geologia*0,10)$$

Tabela 05 – Tabela das influências (%) e dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular o risco de erosão baseando-se nas variáveis morfométricas, vegetação, solo, densidade de lineamentos e geologia (Figura 38).

DECLIVIDADE	
Influência (17%)	Pesos
0 – 3%	0
3 – 8%	2
8 – 20%	4
20 – 45%	6
45 – 75%	8
+ 75%	10
ORIENTAÇÃO DE VERTENTES	
Influência (05%)	Pesos
Noroeste	1
Oeste/Norte	2
Sudoeste	4
Nordeste	5
Sudeste	7



Sul	8
Leste	10
<b>CURVATURA VERTICAL</b>	
<b>Influência (15%)</b>	<b>Pesos</b>
Convexa	3
Retilínea	6
Côncava	9
<b>CURVATURA HORIZONTAL</b>	
<b>Influência (09%)</b>	<b>Pesos</b>
Divergente	3
Planar	6
Convergente	9
<b>HIPSOMETRIA</b>	
<b>Influência (07%)</b>	<b>Pesos</b>
200 – 300m	2
300 – 400m	4
400 – 500m	6
500 – 600m	8
600 – 800m	10
<b>VEGETAÇÃO</b>	
<b>Influência (12%)</b>	<b>Pesos</b>
Mata Seca	3
Caatinga arbórea	6
Caatinga arbustiva	9
<b>SOLO</b>	
<b>Influência (14%)</b>	<b>Pesos</b>
Luvissolos	2
Planossolos Nátricos ou Háplicos	4
Argissolos Vermelhos Amarelos Eutróficos	6
Neossolos Litólicos Eutróficos	8
Neossolos Flúvicos Eutróficos	10
<b>DENSIDADE DE LINEAMENTOS (POPULAÇÃO/KM<sup>2</sup>)</b>	
<b>Influência (11%)</b>	<b>Pesos</b>
01	0
02	1
03	5
04	10
<b>GEOLOGIA</b>	
<b>Influência (10%)</b>	<b>Pesos</b>
Quartzitos	1
Quartzitos e Metabásicas	2
Granitóides	3
Granitóides Cinzentos	3
Granitóides Diversos	3
Granitos e Granodióritos	3
Ortognaisses Granito-Granodióritos	4
Ortognaisses, Migmatitos e Metamórfica	4
Gnaisses Migmatitos e Anfibolitos	5
Paragnaisses e Ortognaisses graníticos	6
Paragnaisses	7
Sequência Plutono-Vulcânica	8

Metagabros	9
Metacalcários e Rochas Calcissilicáticas	10
Paragneisses Micaxistos e Metacalcários	10

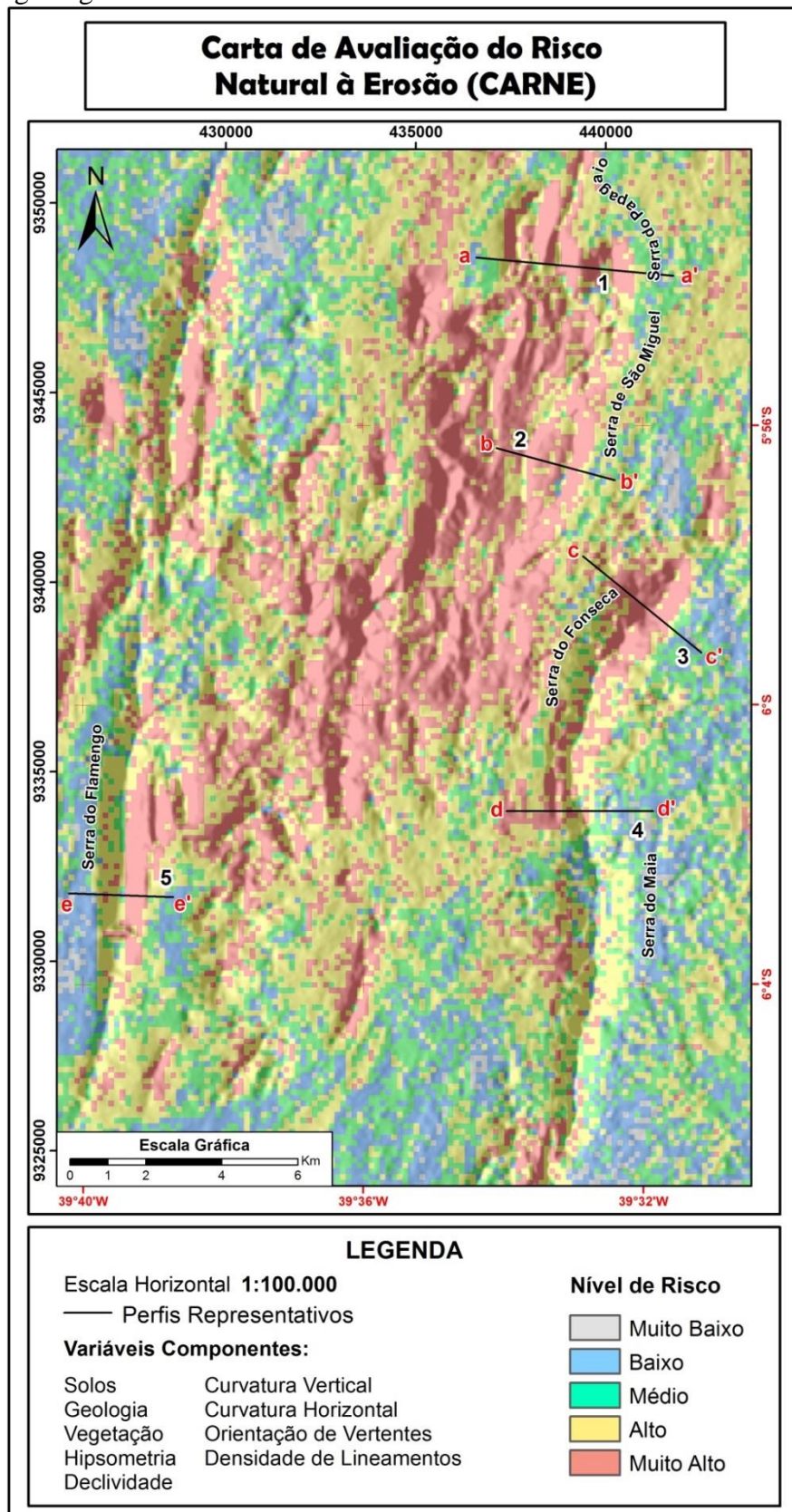
Fonte: Autor.

A Carta de Avaliação do Risco Natural à Erosão (CARNE) apresentou uma espacialização dos graus de risco diferentes daqueles mostrados nas outras cartas de risco (CARMONE e CARAER). A CARNE elevou bastante a possibilidade da região testada está dentro de uma zona de alto risco a erosão, fato que poderia ser preocupante, caso não fosse feita uma análise mais criteriosa para poder averiguar se essa carta realmente pode representar a realidade do terreno da área de estudo.

Os resultados do cálculo de risco apresentados na CARNE mostraram algumas incoerências em relação distribuição geográficas dos níveis de risco à erosão, onde, a maior parte da área de estudo ficou recoberta por riscos de grau alto a muito alto, principalmente na região Central e Norte do Maciço onde estão localizadas as Serras do Papagaio (Perfil 1 a-a', Figura 36), São Miguel (Perfil 2 b-b', Figura 36) e Fonseca (Perfil 3 c-c', Figura 36). No setor Sul predominou os níveis de risco de médio e baixo, onde os graus de risco mais altos estão situados nas vertentes da Serra do Flamengo (Perfil 5 e-e', Figura 36) e em alguns pontos enclaustrados na Depressão Periférica.

Outro ponto de incoerência em relação ao tipo de risco está localizado nas vertentes da Serra do Maia (Perfil 4 d-d', Figura 36), onde os riscos apontados estão entre moderado a baixo, contradizendo os níveis de risco mostrados nas outras cartas apresentadas. Esses resultados apresentados na maior parte da área de estudo estão em desacordo com as declividades e com a morfologia do terreno apesar desses varáveis terem recebido uma maior influencia (%) no cálculo do mapa. Essas incoerências apontadas na CARNE podem está relacionadas a quantidade de informações cruzadas para derivar o produto final, talvez essas informações necessitasse passar por uma avaliação criteriosa para que fossem melhoradas.

Figura 38 – Mapa de avaliação de riscos a erosão, baseando-se nas variáveis morfométricas, vegetação, solo, densidade de lineamentos e geologia.



Fonte: Autor.

Esse mapa pode levantar uma discussão bastante pertinente a respeito das bases de dados utilizadas para o cálculo das áreas com possibilidades de erosão. As bases originais dos mapas de geologia, de solo e de vegetação foram adquiridos na escala de 1:500.000. Identificar riscos mais localizados com esse tipo de base não é muito confiável, o recomendado seria fazer um mapeamento mais detalhado da Geologia, dos tipos de solos e da vegetação natural.

### 6.2.3 – Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão (CARAER)

Na análise da susceptibilidade ao risco ambiental quanto à erosão foi utilizada como principal variável a cobertura e uso da Terra (água, vegetação densa, vegetação aberta, área de cultivos e solo exposto – Figura 39), que caracterizam as unidades de paisagens do terreno modificadas pelas atividades antrópicas, o que permite estabelecer a avaliação ambiental. Os valores da influência e dos pesos atribuídos a essa variável, bem como as outras variáveis, permitiram definir os pontos de maiores e de menores grau de erosão (Tabela 06).

Tabela 06 – Tabela das influências (%) e dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular o risco de erosão baseando-se na morfologia e na cobertura e uso da Terra (Figura 40).

<b>DECLIVIDADE</b>	
<b>Influência (25%)</b>	<b>Pesos</b>
0 – 3%	0
3 – 8%	2
8 – 20%	4
20 – 45%	6
45 – 75%	8
+ 75%	10
<b>ORIENTAÇÃO DE VERTENTES</b>	
<b>Influência (10%)</b>	<b>Pesos</b>
Noroeste	1
Oeste/Norte	2
Sudoeste	4
Nordeste	5
Sudeste	7
Sul	8
Leste	10
<b>CURVATURA VERTICAL</b>	
<b>Influência (20%)</b>	<b>Pesos</b>
Convexa	3
Retilínea	6
Côncava	9
<b>CURVATURA HORIZONTAL</b>	

Influência (10%)	Pesos
Divergente	3
Planar	6
Convergente	9
COBERTURA E USO DA TERRA	
Influência (35%)	Pesos
Água	0
Vegetação Densa	2
Vegetação Aberta	4
Áreas de Cultivo	6
Solo Exposto	10

Fonte: Autor.

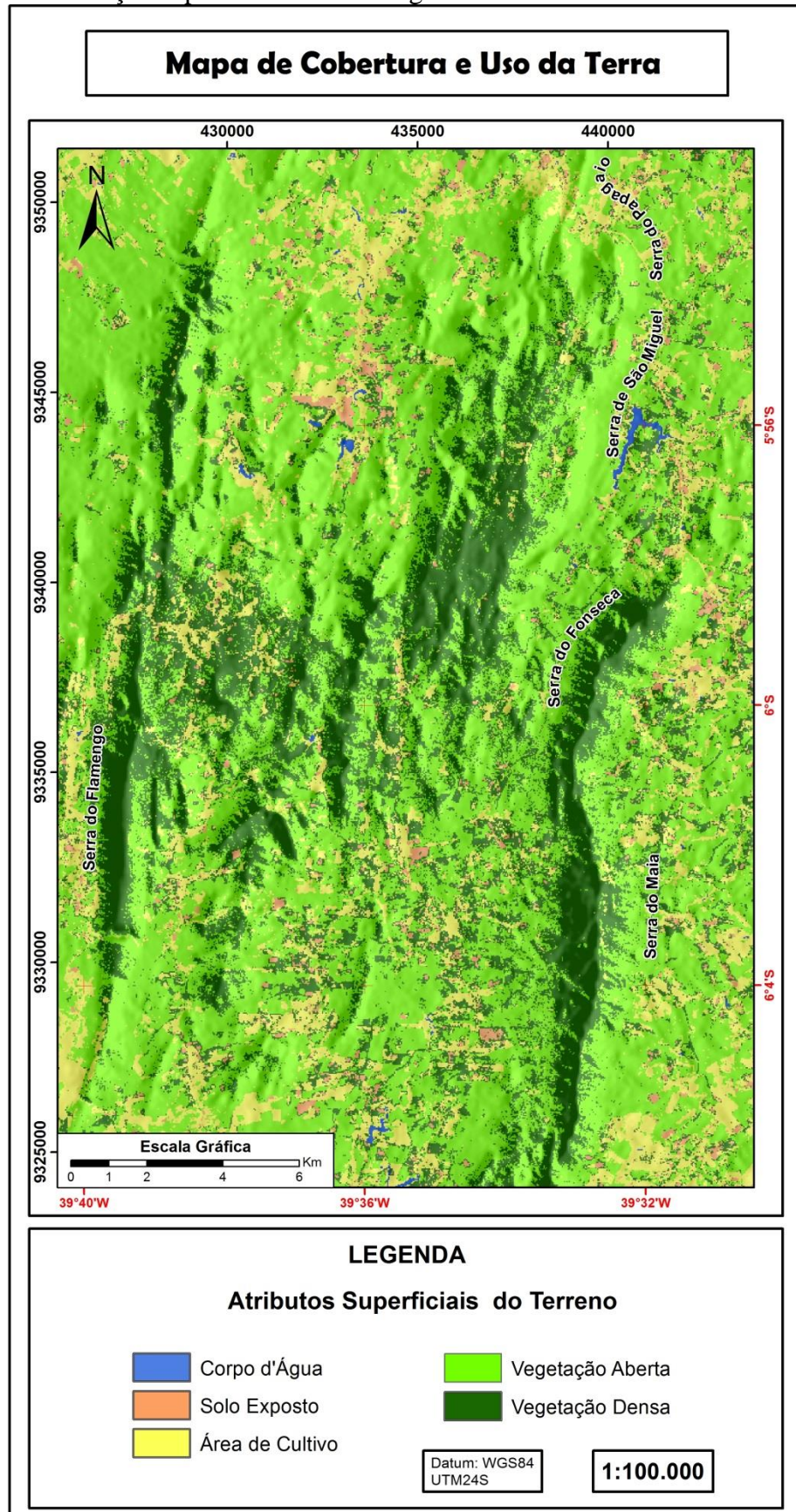
Para o cálculo Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão (CARAER) (Figura 40) considerou-se nesse caso que a cobertura e uso da Terra teriam mais influência que a declividade e as outras variáveis morfométricas.

Logo, a fórmula matemática para geração da carta foi a seguinte:

$$CARAER = (cobertura\ e\ uso\ da\ Terra * 0,35) + (curvatura\ vertical * 0,20) + (curvatura\ horizontal * 0,10) \\ + (orientação\ de\ vertente * 0,10) + (declividade * 0,25)$$

A cobertura e uso da Terra podem aumentar ou diminuir a fragilidade do terreno em relação ao risco de erosão. A vegetação fechada, caracterizada pela vegetação de caatinga arbórea-arbustiva, pode minimizar o risco de uma possível erosão mais severa, mesmo em terrenos inclinados, o contrário ocorre com o solo exposto, que possibilita aumentar consideravelmente o risco de haver uma erosão drástica em encostas íngremes ou mesmo em terrenos mais suaves. Já as áreas de cultivo, assim como a de vegetação aberta (vegetação de caatinga arbustiva-rasteira), podem aumentar consideravelmente o risco de erosão, principalmente em vertentes inclinadas. Com base nestas características e observações feitas em campo, foram definidos os pesos diferenciados, além de ter colocado a cobertura e uso da Terra com maior influência na avaliação feita, pela importância na análise das ações antrópicas pertinentes ao terreno, dando a visão ambiental do processo.

Figura 39 – Mapa de cobertura e uso da Terra feito a partir de classificação supervisionada da imagem Landsat 8.



Fonte: Autor.

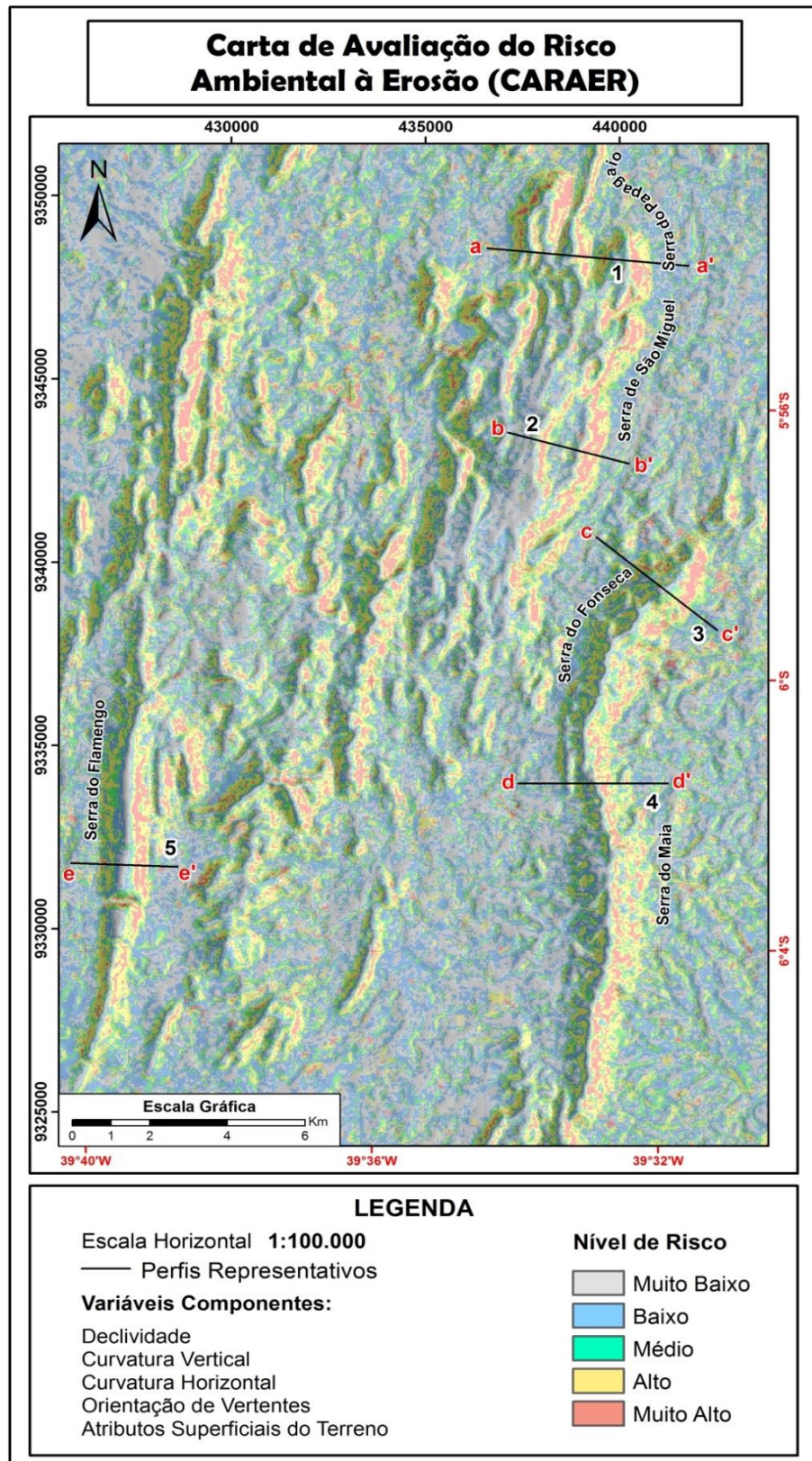
Nesse caso a ação antrópica é preponderante para a análise de riscos, pois o ato de cultivar a terra deixa o ambiente mais fragilizado e mais susceptível à erosão, pois para desenvolver seus cultivos é necessário retirar a vegetação mais densa para fazer o plantio, após a colheita esses locais dificilmente voltaram a mesma vegetação de antes, dando lugar assim aos solos expostos e a vegetação mais aberta. Levando em consideração esse equilíbrio ténue podemos constatar que a variável cobertura e uso da Terra pode, assim como a morfologia do terreno, ser considerada como importante quando se analisa o grau e a probabilidade de ocorrer uma erosão mais acentuada ou não no terreno.

Os resultados apresentados no mapa da Figura 40 mostraram que em grande parte das encostas ocorre um risco de erosão alto a muito alto, principalmente onde se verificou a uma diminuição da vegetação densa e a presença de declividades mais acentuada. Os riscos considerados muito altos estão localizados principalmente nas vertentes Leste das Serras do Papagaio (Perfil 1 a-a', Figura 36), São Miguel (Perfil 2 a-a', Figura 36), Fonseca (Perfil 3 a-a', Figura 36), Maia (Perfil 4 a-a', Figura 36) e Flamengo (Perfil 5 a-a', Figura 36).

Nas vertentes Oeste dessas serras os graus de risco considerados alto e muito alto ficaram restritos a locais pontuais onde as declividades são maiores, nessas vertentes verificou-se ainda que a vegetação é mais densa formando assim uma proteção natural a erosão em grande parte dessas encostas. Verificou-se também que nas áreas de relevos suaves também ocorreu pontos de grau de risco elevados (alto, muito alto), esses pontos coincidem com, as regiões de vegetação aberta, com as áreas de cultivos e principalmente com as manchas de solos expostos.

Em grande parte dos topos das serras e na depressão periférica os riscos de erosão variaram de muito baixo a moderado, no entanto há pontos de risco alto e muito alto. Essas áreas com riscos considerados baixos estão recobertas por vegetação densa que diminuem bastante o risco à erosão ou por espelhos d'água, que por sua vez praticamente anula a possibilidade de haver a erosão nesses locais recobertos por espelhos d'água.

Figura 40 – Mapa de avaliação de risco à erosão baseado na morfologia do terreno dada pelas variáveis morfométricas, declividade, orientação de vertente, curvaturas vertical e horizontal e cobertura e uso da Terra.



Fonte: Autor.



---

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

## 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou um estudo das características geomorfológicas e uma análise de risco a erosão das Serras da Porção Sul do Maciço Central do Ceará, realizado a partir de dados sensoramento remoto, principalmente a partir de topografia digital (modelos digitais de elevação), utilizando as técnicas e ferramentas fornecidas pelo Geoprocessamento.

Inicialmente foram realizados testes onde se pôde escolher o melhor produto para analisar as formas do terreno e as possibilidades de risco à erosão que área estaria sujeita. Esses testes consistiram em uma análise comparativa/qualitativa dos produtos de variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvaturas horizontal e vertical) gerados a partir dos MDE do SRTM, do GDEM e do TOPDATA, utilizando três escalas de observação (1:100.00, 1:50.000 e 1:25.000). Estas análises permitiram avaliar quais modelos e quais escalas foram mais adequadas para representar tais variáveis para a área em estudo. Com base nos resultados alcançados podemos concluir que na comparação dos MDE em relação resolução/escala de trabalho, o TOPODATA foi o que melhor representou as variáveis morfométricas avaliadas nas três escalas analisadas (1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000), o ASTER-GDEM apresentou como o pior em função de excesso de ruídos de dados e o SRTM tem uma limitação de uso na escala 1:100.000 devido a resolução.

Os dados digitais extraídos do MDE do TOPODATA representaram bem as informações reais de relevo, comprovadas pela visitação em campo. A validação dos produtos gerados a partir do MDE do Topodata (declividade, orientação de vertentes, curvaturas horizontal e vertical) foi realizada através de um trabalho de campo, esse procedimento teve fundamental importância para verificar se o modelo gerado computacionalmente é confiável e compatível com a realidade. A validação dos dados morfométricos a partir do MDE do TOPODATA permitiu criar os mapas de risco com maior confiabilidade na escala de 1:100.000;

A operação feita com álgebra de mapas permitiu a geração dos mapas de risco por meio da ponderação feita entre os dados existentes nos mapas (PESOS) e entre os mapas temáticos (INFLUÊNCIAS). Os tipos de mapas de riscos gerados são novas propostas de avaliação de risco quanto à erosão em regiões com terrenos elevados e encostas íngremes;

A CARMONE teve por objetivo avaliar o risco somente com os dados de morfometria, onde os resultados levarem em conta o risco da geometria do relevo, ou seja, sem nenhuma variável que minimizasse o efeito erosivo, por isso as áreas de risco muito alto se destacaram. A CARNE teve como proposta a análise de risco natural envolvendo as variáveis mais tradicionais para avaliação, porém devido a resolução de alguns mapas usados como base comprometeu na qualidade do resultado final. A CARAER avaliou o risco ambiental por meio da integração do mapa de atributos superficiais, como forma de análise da ação do homem no meio. Sendo este o mais representativo entre os analisados. Os mapas de risco são importantes para planejamento do uso e ocupação do terreno avaliado, bem como para conscientização da população local quanto aos riscos e a importância de preservar o meio em que vivem.

Recomenda-se que a partir desses dados fossem feitos os mapas mais detalhados das variáveis utilizadas na CARNE, e que os pesos aplicados fossem também reavaliados com base no detalhe alcançado em estudos mais aprofundados. A partir da proposta de integração e análise dos dados apresentado nesse trabalho, recomenda-se fazer análises mais criteriosa utilizando as novas gerações de dados com alta resolução espacial a exemplo dos MDE e das imagens multiespectrais de alta resolução espacial adquiridos a partir de plataformas orbitais, podendo assim fazer análises de risco à erosão com maior precisão quanto a morfologia e os atributos superficiais ambientais do terreno.

---

## REFERÊNCIAS

---

## REFERÊNCIAS

AKGÜN, A.; TÜRK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalık region, NW Turkey. **Computers&Geosciences**, v. 37, p. 1515-1524, 2011.

ALMEIDA; A. R. de; PARENTE, C. V.; ARTHAUD, M. H. **Itatira- SB.24-V-B-V, escala 1:100.000: nota explicativa integrada com Quixeramobim e Boa Viagem**. Ceará: UFC/CPRM, 2007. 196p.

ANGELIM, L.A.A.; VASCONCELOS, A.M.; GOMES, JR.C.; WANDERLEY, A.A.; FORGIARINI, L.L.; MEDEIROS, M. de F. **Folha SB.24-Jaguaribe**. In: SCHOBENHAUS, C.; GONCALVES, J. H.; SANTOS, J.O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; VIDITTE, R. M.; RAMOS, M. A. B.; JESUS, J. D. A. de. (eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas – SIG, Programa Geologia do Brasil, CPRM, Brasília. 2004.

ANJOS, D. S.; MENEGUETTE JUNIOR, M. Análise da Curvatura de Vertentes via Thin Plate Spline e Inferência Fuzzy. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA E V COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2007, Presidente Prudente. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Presidente Prudente, 2007.

ARNOLD, N. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. **Progress in Physical Geography**, v. 34, n. 6, p. 781-809, 2010.

ARTHAUD, M. H. **Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da Sedimentação à Colisão Continental Brasileira**. 2007. 170 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências – IG, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2007.

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe –PE**. 2003. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

BATISTA, C. T. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento geotécnico em escala regional – o caso da serra de Baturité, CE**. 2014. 218 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Contribuição: PASSOS, E.; HERRMANN, M. L. de P.; SANTOS, G. F. dos, MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003.

BISPO, P. da C. **Dados geomorfométricos como subsídio ao mapeamento da vegetação**. 2007. 126 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2007.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 24/08/2014.

CAVALCANTE, J. C. **Limites e Evolução Geodinâmica do Sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil**. 1999. 177 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio grande do Norte – UFRN, 1999.

CAVALCANTE, J. C.; VASCONCELOS, A. M.; MEDEIROS, M. de F.; PAIVA, I, G.; GOMES, F. E. M.; CAVALCANTE, S. N.; CAVALCANTE, J. E.; MELO, A. C. R. de; NETO, V. C. D. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2003. Escala 1:500.000.

CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Mapa Fitoecológico** (Base vetorial – shp). Fortaleza: FUNCEME, 1994.

CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Mapa de Recursos Hídricos (Base vetorial – shp)**. Fortaleza: FUNCEME, 2013.

CLAUDINO-SALES, V. Sistemas Naturais e Degradação Sócio-Ambiental no Estado do Ceará. In: FORUM DA SOCIEDADE CIVIL CEARENSE SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Diagnóstico Sócio-Ambiental do estado do Ceará: O olhar da sociedade civil**. Fortaleza: 1993. p. 09-36.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: 2ª ed. Edgard Blucher, 1980.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine init land surface model. **Zeitschrift für Geomorphologie**. 1968. p. 60-76.

DELGADO, I. de M.; SOUZA, J. D. DE; SILVA, L. C. da; FILHO, N. C. da S; SANTOS, R. A. do; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T; ANGELIM, L. A. de A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; FILHO, J. V. DE L.; VALENTE, C. R.; PERROTTA, M. M.; E HEINECK, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Org.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

DEMARCHI, J. C. **Geotecnologias aplicadas à estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP**. 2012. 150 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

DUMAS, P.; INTEMPS, J. P. R; MANGEAS, M.; LUNEAU, G. Developing erosion models for integrated coastal zone management: A case study of The New Caledonia west coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 61, p. 519-529, 2010.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. P. 306.

ERSDAC, LP DAAC. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Global digital elevation model (GDEM) Version. **ASTER GDEM 2 Readme**, 2011

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, RG2004, 2007.

FENG, W-W.; BAJCSY, P. Extracting Topographic Features From Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Images. **Technical Report**, 2005.

FERREIRA, A. G; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista brasileira de climatologia**, vol. 1, n. 1, 2005.

FERREIRA, C. A.; SANTOS, E. J. dos. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE, Folha SB.24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco**. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM, 2000.

FETTER, A. H.; VAN SCHMUS, W. R.; SANTOS, T. J. S. dos; NETO, J. A. N. ARTHAUD, M. H. U-Pb and Sm-Nd Geochronological Constraints on the Crustal Evolution and Basement Architecture of Ceará State, Nw Borborema Province, Ne Brazil: Implications for the Existence of the Paleoproterozoic Supercontinent "Atlantica". **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 102-106, 2000.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

FONI, A.; SEAL, D. Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control. **Acta Astronautica**, v. 54 p. 565-570, 2004.

GOMES, J. R. de C.; VASCONCELOS, A. M. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe-SW, Folha SB.24-Y. Estados do Ceará, de Pernambuco e do Piauí**. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM, 2000.

GOMES, J. R. de C.; VASCONCELOS, A. M.; TORRES, P. F. M. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. **Carta Geológica Jaguaribe-SW SB.24-Y**. Fortaleza: CPRM, 2000. Escala 1:500.000.

HILBERTS, A.G.J.; LOONA, E.E.V.; TROCHA, P.A.; PANICONI, C. The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 160-173, 2004.

IBGE. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

JAKOB, J.; VAN, Z. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, Great Britain, v. 48, n. 5-12, p. 559-565, 2001.

JULIAN, J. P.; ELMORE, A. J.; GUINN, S. M. Channel head locations in forested watersheds across the mid-Atlantic United States: A physiographic analysis. **Geomorphology**, v. 177-178, p.194–203, 2012.

MABESSONE, J. M. História Geológica da Província Borborema (NE Brasil). **Revista de Geologia**, v. 15, p. 119-129, 2002.

MASKREY, A. **NAVEGANDO ENTRE BRUMAS**: La aplicación de los sistemas de información Geográfica al análisis de riesgo en América Latina. La Red, 1998.

MA/SUDENE. Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará – escala 1:600.000,1973. (Copilado): Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará** (Base vetorial – shp). Fortaleza: FUNCEME, [200-?].

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: Noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007. v. 1. 208 p.

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

NOVO, E. M. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, M. C. Construção de uma carta para determinação de orientação de vertentes. **Revista do Instituto Geológico**, v. 5, n.1/2, p. 47-50, 1984.

PEREIRA, R. C. M; SILVA, E, V. Solos e Vegetação do Ceará: características gerais. In: SILVA, J. B; CAVALCANTE, T. C; DANTAS, E. W. C (Org.). Ceará: um novo olhar geográfico. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2005.

PFALTZGRAFF, P. A. dos S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do recife**. 2007. 151 p. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar e Ambiental) Faculdade de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PIERCE, L.; KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; BARROS, O. Evaluation of the Horizontal Resolution of SRTM Elevation Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1235-1244, 2006.

PORTO, C. G. Intemperismo em regiões tropicais. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.



PRADHAN, B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. **Advances in Space Research**, v. 45, p. 1244-1256, 2010.

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

RITTER, D. F.; KOCHEL, R. C.; MILLER, J. R. **Process Geomorphology**. Reissued: 4<sup>a</sup> ed. Waveland Press, 2006.

SILVA FILHO, A. F. da; GOMES, H. de A.; OSAKO, L. S.; GUIMARÃES, I. de P.; BRASIL, E. de A.; LIMA, D. R.; COCENTINO, L.; VILLAVERDE, V. G. R.; VASCONCELOS, C. de L. **Garanhuns - SC.24-X-B-VI, escala 1:100.000: nota explicativa**. Alagoas: UFPE /CPRM, 2007. 67p.

SOUZA, M. J. N. Contribuição ao estudo das unidades morfoestruturais do estado do Ceará. **Revista de Geologia**, v.1, n.1, p. 73-91, 1988.

TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; CARABAJAL, C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. In: MEYER, D. (Org.). ASTER GDEM Validation Team, NASA, 2011.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de modelos digitais de elevação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 11, 2003. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte: 2003, INPE, p. 409-411, 2003.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72 p., 2004.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72 p., 2008.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata: processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-16702-RPQ/854). 79 p., 2010.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.

VASCONCELOS, A. M.; PRADO, F. da S.; GOMES, F. E. M. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. **Carta Geológica, Folha Iguatu SB.24-Y-B**. Fortaleza: CPRM 1997. Escala 1:250.000.

WEILL, M.A.M.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R. A. Potencial natural de erosão e riscos de degradação na bacia hidrográfica do rio Mogi – Guaçú (SP). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, Goiânia, Brasil, 05, 2001. **Anais VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão**, Goiânia: 2001, p. 01-10, 2001.

WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, p. 107-121, 2012.

WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. Digital terrain analysis In: WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (Org.). **Terrain Analysis: principles and applications**. New York: Wiley, 2000. p. 01-28.

ZANELLA, M. E. Caracterização Climática e os recursos hídricos do Estado do Ceará. In: SILVA, J. B.; CAVALCANTE, T. C; DANTAS, E. W. C (Org.). **Geografia do Ceará: Um Novo Olhar Geográfico**. Fortaleza - CE: Ed. Demócrito Rocha, 2005, v. 01, p. 169-188.

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

---

## ANEXO

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**ALCIONE MOREIRA DO CARMO**

**UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE  
MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLÓGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL  
DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ**

**ANEXO – CARTAS DE RISCO À EROSÃO**

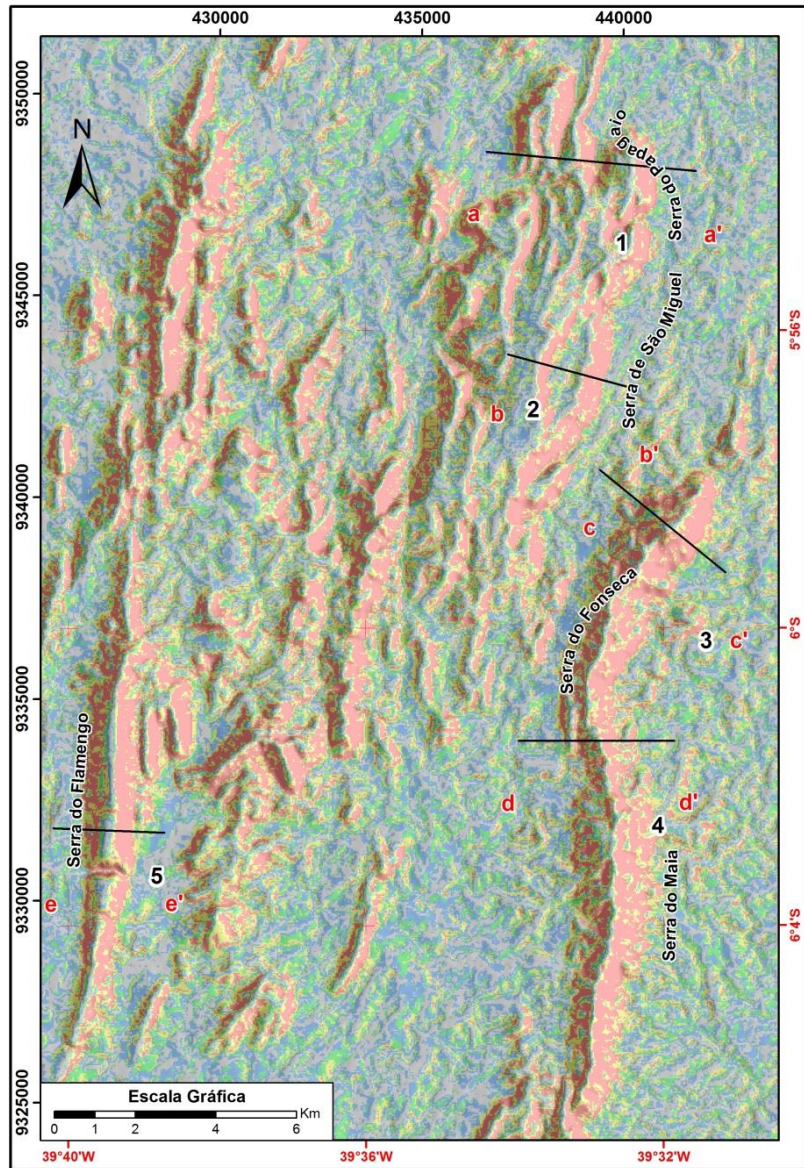
**CARMONE**

**CARNE**

**CARAER**

**FORTALEZA/CE – 2014**

# Carta de Avaliação do Risco Morfológica Natural à Erosão (CARMONE)



## LEGENDA

Nível de Risco	
Grey	Muito Baixo
Blue	Baixo
Green	Médio
Yellow	Alto
Red	Muito Alto

## VARIÁVEIS COMPONENTES: Influências - %

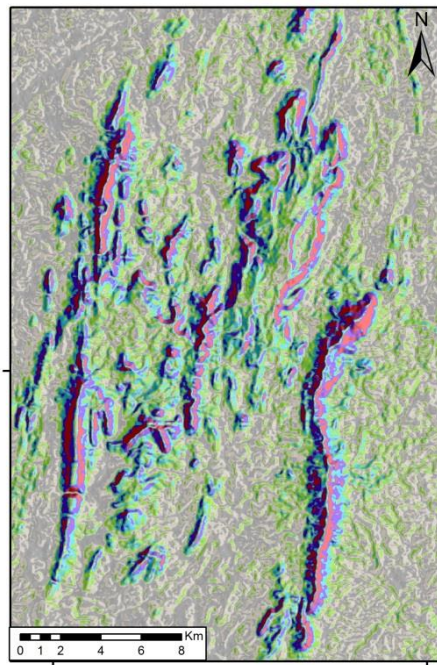
Declividade - 35%  
 Curvatura Vertical - 30%  
 Curvatura Horizontal - 20%  
 Orientação de Vertentes - 15%

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
 Centro de Ciências  
 Programa de Pós-Graduação em Geologia  
 UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLÓGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ  
 Autor: Alcione Moreira do Carmo  
 Orientador: Dr. Michael Vandesteem Silva Souto  
 Co-orientadora: Dra. Cynthia Romariz Duarte

( ) Pesos dos atributos dos mapas  
 — Perfis Representativos

Datum: WGS84  
 UTM24S

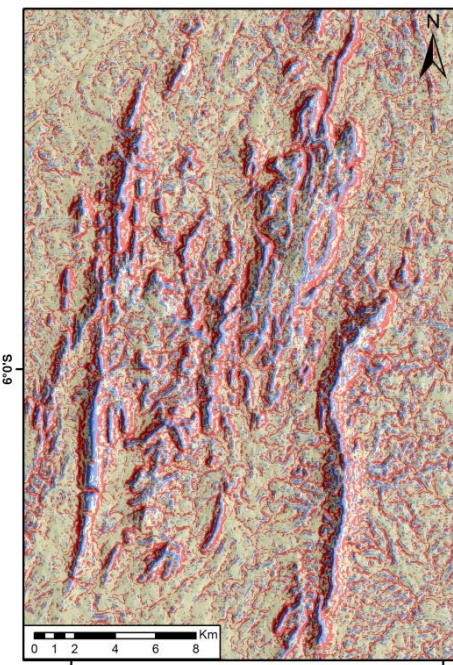
## Declividade



### Legenda

Grey	(0) 0 - 3%	Light Blue	(6) 20 - 45%
White	(2) 3 - 8%	Purple	(8) 45 - 75%
Light Green	(4) 8 - 20%	Red	(10) + 75%

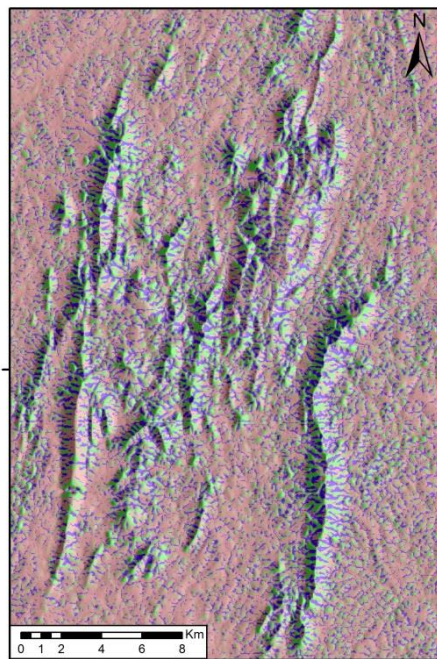
## Curvatura Vertical



### Legenda

Blue	(3) Convexa	Yellow	(6) Retilínea	Red	(9) Côncava
------	-------------	--------	---------------	-----	-------------

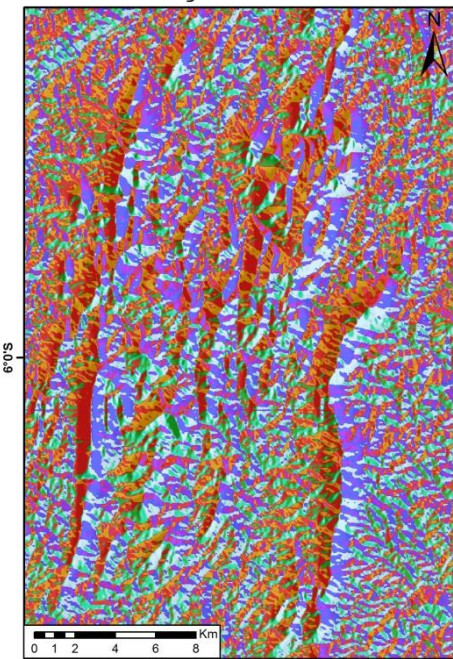
## Curvatura Horizontal



### Legenda

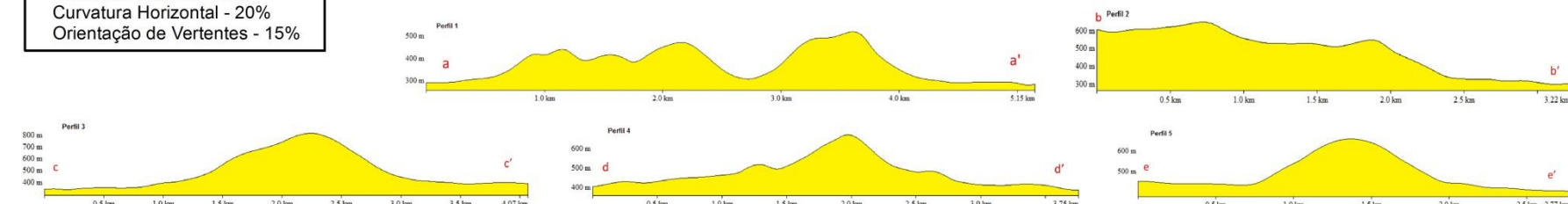
Green	(3) Divergente	Light Blue	(6) Planar	Purple	(9) Convergente
-------	----------------	------------	------------	--------	-----------------

## Orientação de Vertente

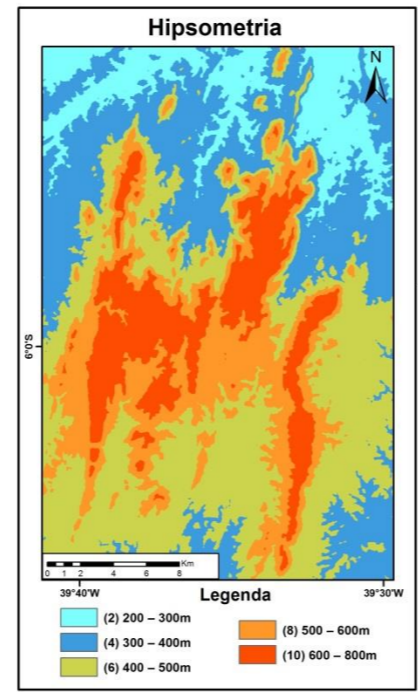
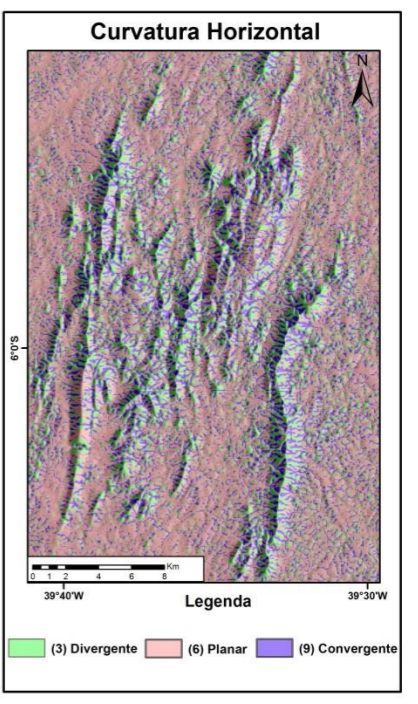
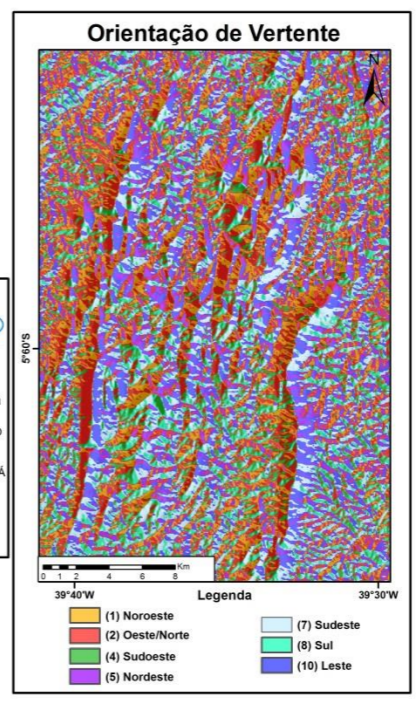
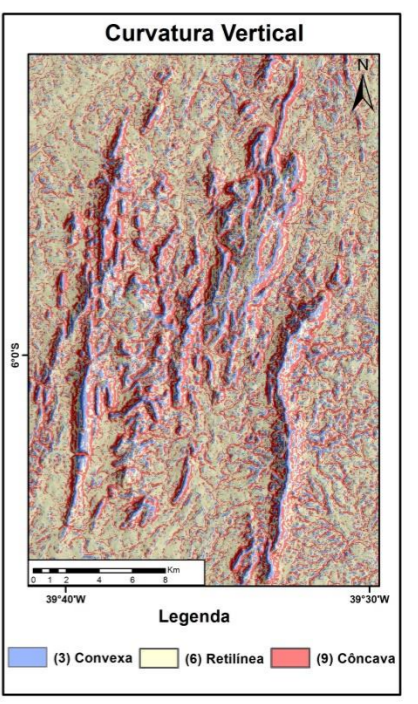
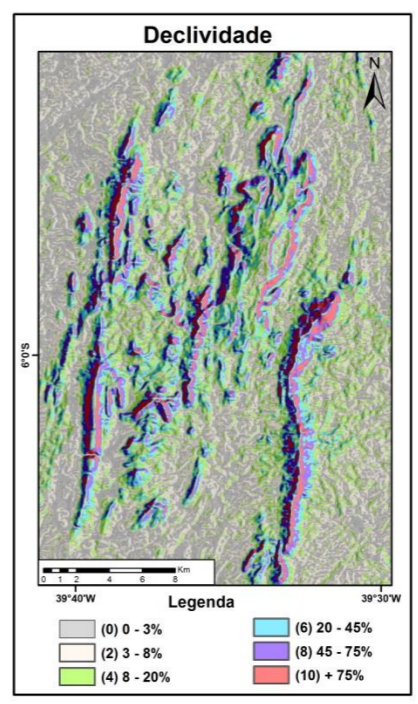
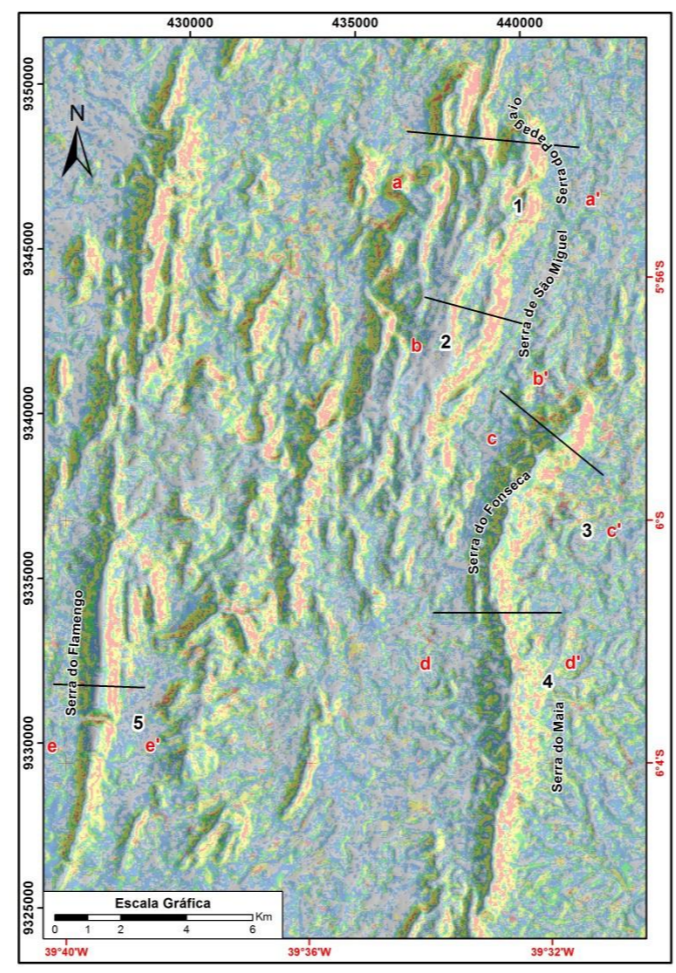
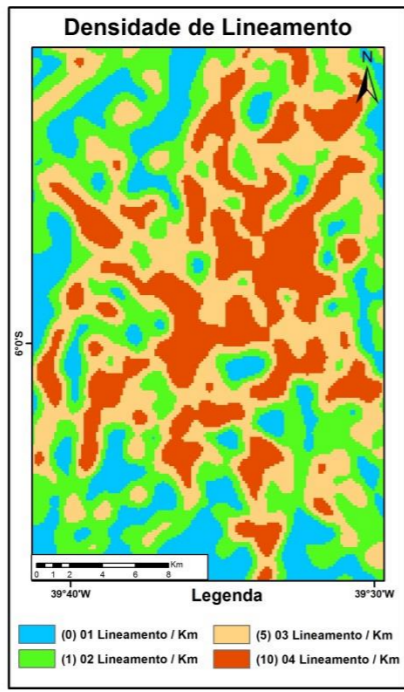
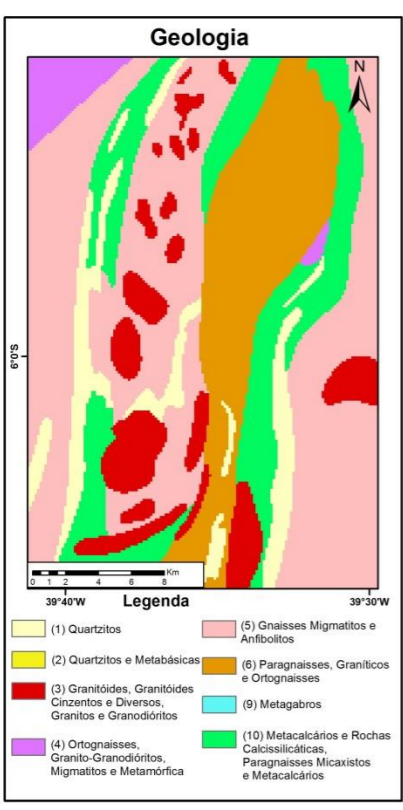
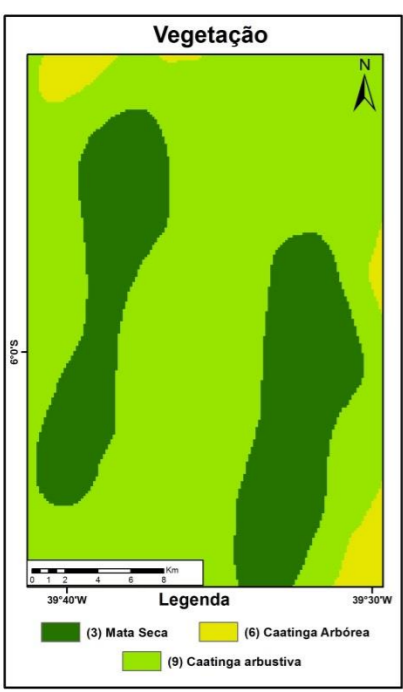


### Legenda

Orange	(1) Noroeste	Light Blue	(7) Sudeste
Red	(2) Oeste/Norte	Green	(8) Sul
Green	(4) Sudoeste	Purple	(10) Leste
Purple	(5) Nordeste		



# Carta de Avaliação do Risco Natural à Erosão (CARNE)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
 Centro de Ciências  
 Programa de Pós-Graduação em Geologia

UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLÓGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ

Autor: Alcione Moreira do Carmo  
 Orientador: Dr. Michael Vandestein Silva Souto  
 Co-orientadora: Dra. Cynthia Romariz Duarte

**LEGENDA**

**Nível de Risco**

- Muito Baixo
- Baixo
- Médio
- Alto
- Muito Alto

— Perfis Representativos  
 ( ) Pesos dos atributos dos mapas

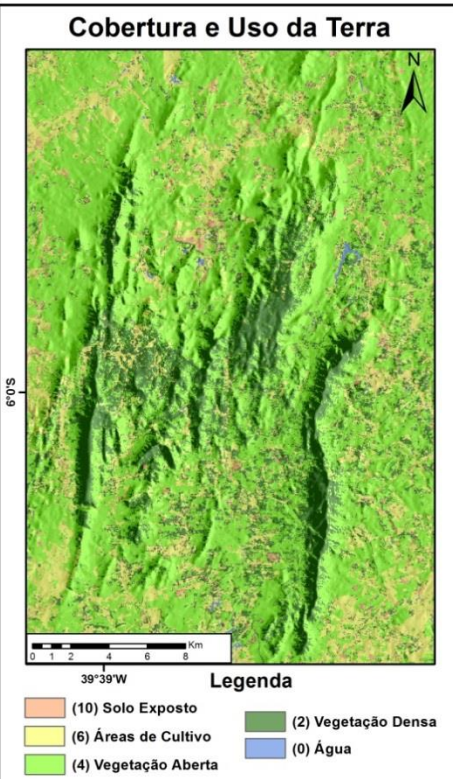
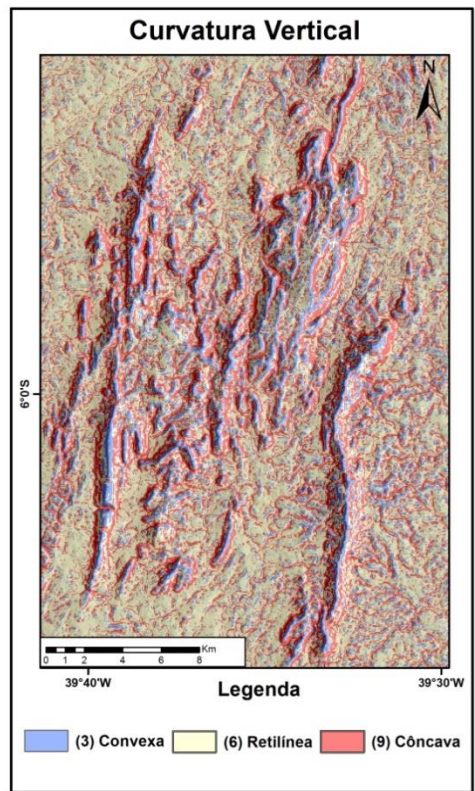
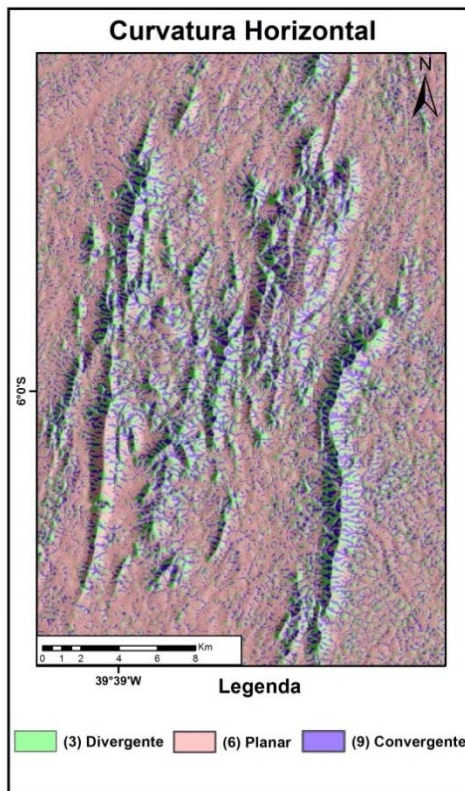
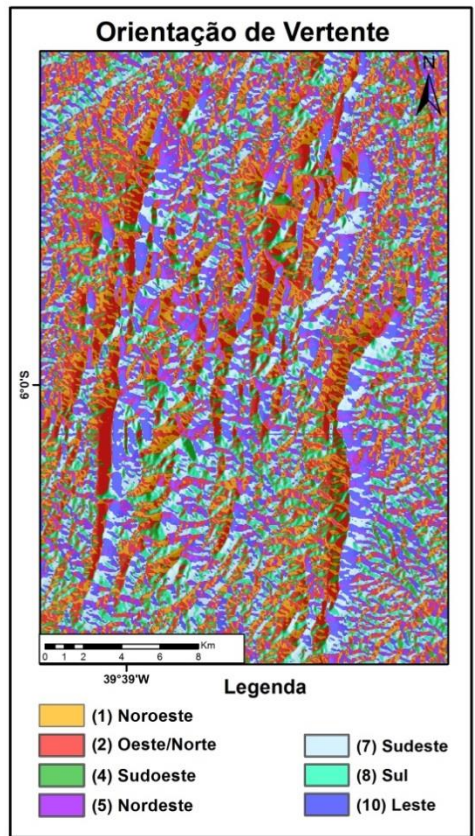
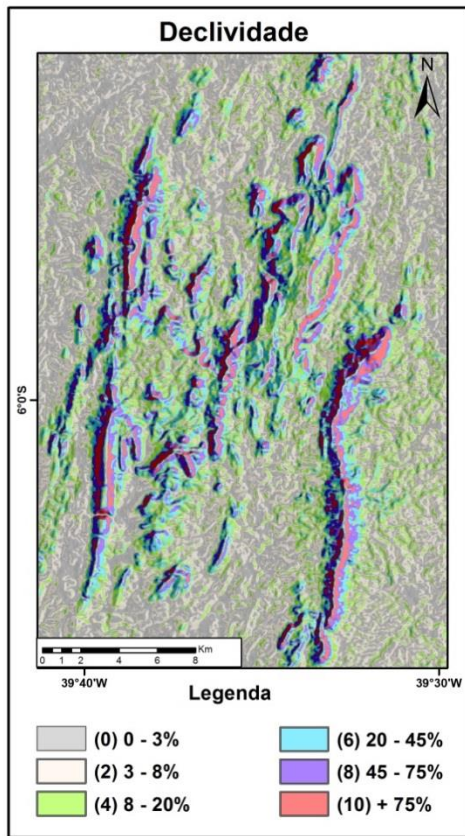
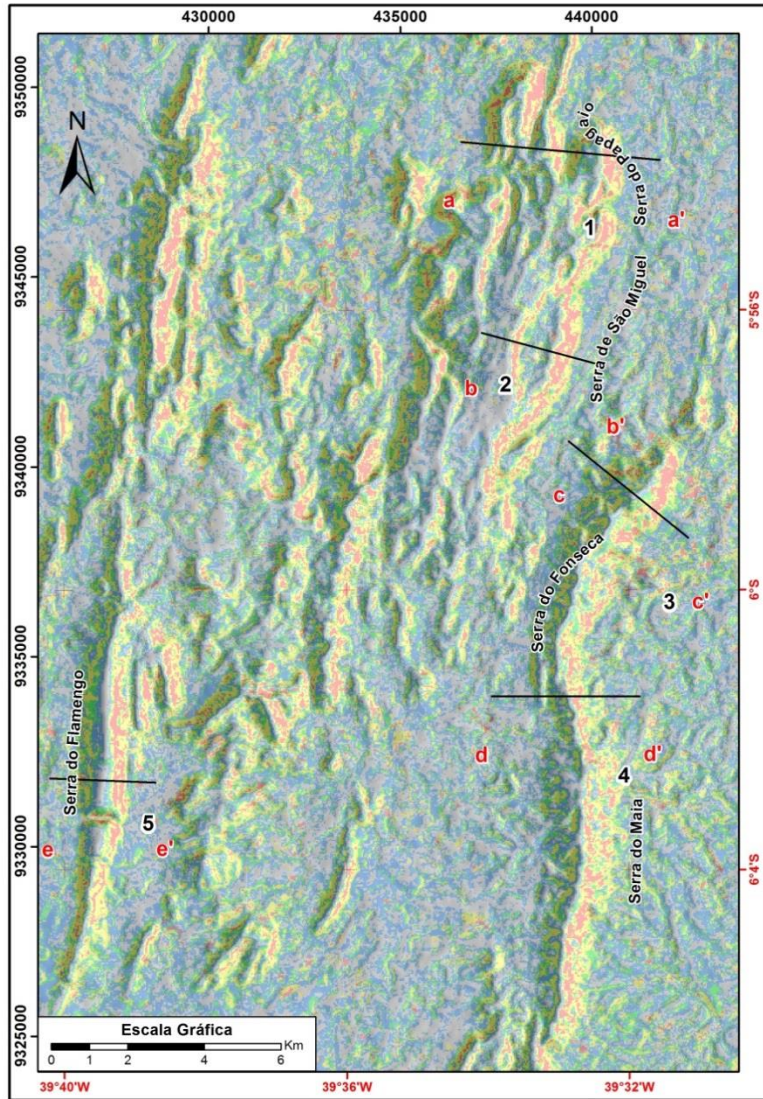
Datum: WGS84  
 UTM24S

**VARIÁVEIS COMPONENTES: Influências - %**

Curvatura Vertical - 15%	Solos - 14%
Curvatura Horizontal - 09%	Vegetação - 10%
Orientação de Vertentes - 05%	Geologia - 12%
Densidade de Lineamentos - 11%	Hipsometria - 14%
	Declividade - 17%



# Carta de Avaliação do Risco Ambiental à Erosão (CARAER)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
 Centro de Ciências  
 Programa de Pós-Graduação em Geologia

UTILIZAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E DE RISCO GEOLÓGICO DAS SERRAS DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ

Autor: Alcione Moreira do Carmo  
 Orientador: Dr. Michael Vandestein Silva Souto  
 Co-orientadora: Dra. Cynthia Romariz Duarte

**VARIÁVEIS COMPONENTES:**  
 Influências - %

Declividade - 25%  
 Curvatura Vertical - 20%  
 Curvatura Horizontal - 10%  
 Orientação de Vertentes - 10%  
 Cobertura e Uso da Terra - 35%

**LEGENDA**

**Nível de Risco**

Muito Baixo	Amarelo
Baixo	Verde
Médio	Laranja
Alto	Roxo
Muito Alto	Vermelho

( ) Pesos dos atributos dos mapas  
 — Perfis Representativos

Datum: WGS84  
 UTM24S

