

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**MODELAGEM DE TERRENO COM BASE NA
MORFOMETRIA E EM SONDAGENS GEOTÉCNICAS
- REGIÃO DE GOIÂNIA - GO**

PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-034/06

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELAGEM DE TERRENO COM BASE NA MORFOMETRIA E EM
SONDAGENS GEOTÉCNICAS - REGIÃO DE GOIÂNIA - GO**

PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc - UnB
(ORIENTADOR)**

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, DSc - UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**NORIS COSTA DINIZ, DSc - UnB
(EXAMINADORA INTERNA)**

**TARCÍSIO BARRETO CELESTINO, Ph. D. - USP
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**SELMA SIMÕES DE CASTRO, DSc - UFG
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: Brasília / DF, 27 de MARÇO de 2006.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

MODELAGEM DE TERRENO COM BASE NA
MORFOMETRIA E EM SONDAGENS GEOTÉCNICAS
- REGIÃO DE GOIÂNIA - GO

PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

BANCA EXAMINADORA:

NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc - UnB (ORIENTADOR)

JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, DSc - UnB (EXAMINADOR INTERNO)

NORIS COSTA DINIZ, DSc - UnB (EXAMINADORA INTERNA)

TARCÍSIO BARRETO CELESTINO, Ph. D. - USP (EXAMINADOR EXTERNO)

SELMA SIMÕES DE CASTRO, DSc - UFG (EXAMINADORA EXTERNA)

Brasília / DF: MARÇO / 2006.

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 de MARÇO de 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

ROMÃO, PATRÍCIA DE ARAÚJO

Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - região de Goiânia - GO. xxiv, 166 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2006).

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Modelagem de terreno

2. Morfometria

3. Sondagens geotécnicas

4. Cartografia geotécnica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ROMÃO, P. A. (2006). Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - região de Goiânia - GO. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-034/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 166p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Patrícia de Araújo Romão

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - região de Goiânia - GO.

GRAU: Doutor ANO: 2006

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

Patrícia de Araújo Romão

Universidade Federal de Goiás - Campus Samambaia

Instituto de Estudos Sócio-Ambientais - IESA

Caixa Postal: 131 - Fone: (62) 3521-1077

Cep: 74.001-970 - Goiânia/GO - Brasil

AGRADECIMENTOS

Ao professor Newton Moreira de Souza, por ter de novo me permitido a sua orientação científica sempre com valiosas contribuições, pelos conhecimentos transmitidos e pela convivência harmoniosa.

Às empresas ESCOL - Engenharia de Solos e Construções, SONAF - Sociedade Nacional de Fundações, ENGESOL - Engenharia de Solos e SOLOBASE - Engenharia de Solos e Fundações, nas pessoas do Sandoval (SONAF) e Maria Tereza, pelo acesso aos boletins de sondagens geotécnicas. E também ao professor José Elói pelo auxílio no levantamento de dados de investigação do subsolo da região de Goiânia.

À COMDATA, pela disponibilização do programa SIGGO e informações do Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (MUBDG).

À Universidade Federal de Goiás e Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, pela liberação e ao programa PICDT/CAPES, pelo financiamento por meio da bolsa de doutorado.

Aos professores do Programa de Pós Graduação da Universidade de Brasília, pelo ambiente acadêmico disponibilizado e aos colegas Renato, Hérrnan, Maurício, Néstor, Carlos e Marta.

À Camila, minha filha, que com sua singela existência me incentivou a seguir em frente.

Aos meus pais, Eva e José Adalto e à minha irmã, Alessandra, pois sem eles não teria iniciado e finalizado mais esta etapa.

À minha tia Marta, pela inspiração e acolhida sempre certa.

À minha amiga Gislaine, pela presença incondicional a qualquer momento e ao meu amigo Ivanilton, que desde o projeto tem acompanhado esta pesquisa, pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Rubensmar, pela companhia, precioso carinho e auxílio técnico.

À Angelina, Sebastião e Hélcio, pelo apoio no dia a dia.

À Cláudia Valéria na etapa de finalização desta pesquisa, pelos auxílios constantes; à Luciana e Maria Amélia, pelos essenciais sorrisos e abraços e ao Laerte, pelo auxílio técnico.

Aos amigos Benoit e Marisaidés, pelo incentivo; Ana Cristina Strava e Cláudia Gurjão, pelo auxílio no dia a dia do curso de doutorado.

E principalmente ao Deus e autor da minha vida, doador da minha fé, persistência, esperança e paz.

MODELAGEM DE TERRENO COM BASE NA MORFOMETRIA E EM SONDAGENS GEOTÉCNICAS - REGIÃO DE GOIÂNIA - GO

RESUMO - No que concerne às feições ambientais é reconhecido que a análise da configuração da superfície, de fácil distinção e mensuração a partir da utilização de critérios topográficos, favorece a definição e delimitação de compartimentos indicadores de determinados atributos do solo.

A presente pesquisa parte da modelagem digital do terreno com base em dados morfométricos e em sondagens geotécnicas, referentes à área urbana e de expansão urbana de Goiânia, para o entendimento da distribuição espacial de atributos dos materiais inconsolidados, tendo em vista a escassez de exposições naturais do terreno nessas áreas densamente ocupadas. Dessa forma, o trabalho tem a expectativa de contribuição metodológica à cartografia geotécnica, quanto à associação de informações relativas à modelagem do terreno com os mapeamentos convencionais de condições do solo.

Dados alfanuméricos advindos de investigações do subsolo são armazenados em um sistema de gerenciamento de banco de dados e georreferenciados em uma base de digital, construída em um sistema de informação geográfica (SIG). Tal base digital constitui-se de informações relativas aos materiais inconsolidados, ao substrato rochoso e às feições do relevo, da área de pesquisa.

Apresenta-se, a partir da manipulação de dados altimétricos, modelos numéricos de terreno (MNT), elaborados segundo conceitos relativos à geomorfometria. Tais modelos consistem em células (ponto morfométrico) de uma matriz de índices morfométricos elementares, a saber, a altitude, o gradiente, a orientação e a curvatura das vertentes. E também abrangem informações relativas à superfície (objeto morfométrico), caracterizando o relevo quanto a sua entropia, conceito esse relacionado à amplitude altimétrica da vizinhança em questão.

Do banco de dados alfanuméricos de sondagens geotécnicas, em associação com as informações altimétricas, delineia-se assim um panorama concernente à distribuição dos valores de índices de penetração dinâmica (N_{spt}) em determinadas profundidades, da espessura dos materiais inconsolidados e da profundidade do nível d'água a partir da superfície, de acordo com os respectivos atributos morfométricos.

Terrain Modelling Based on Morphometric Analysis and Geotechnical Profiles – Goiânia, Goiás, Brazil

Abstract – Within the scope of environmental features, it is widely accepted that the use of topographical criteria, which are easily devised and measured, favor the definition and delimitation of indicative compartments of certain soil attributes.

The major goal of the present study, situated in urban area and expansion fronts of Goiania and centered on digital terrain modeling based on morphometric data and borehole logs, is the understanding of the spatial distribution of unconsolidated materials, which are scarcely exposed in densely occupied areas.

With this respect, it is also the expectation of this work to methodologically contribute to the engineering geological mapping, through the association of information relative to terrain modeling and conventional soil condition mapping.

To this end, alphanumeric data from sub-surface investigations, comprising information regarding unconsolidated materials, bedrock, and relief features, were georeferenced to a digital cartographic basis and stored into a geographical information system (GIS).

In particular, digital terrain models (DTM) based on the manipulation of altimetric data and according to geomorphometric criteria, are presented. Such models, encompasses for each matrix cell (morphometric point), the following elementary morphometric indices: altitude, gradient, aspect and slope curvatures. In addition, each cell also contains information relative to the surface (morphometric object), aiming at the characterization of the relief concerning its entropy, a concept related to the altimetric amplitude of a given neighboring region.

From the alphanumeric databasis of the geotechnical core drilling, in association to altimetric information, it was possible to delineate a panorama concerning the distribution of the dynamic penetration index (Nspt) at certain depths, as well as of the thickness of the unconsolidated materials and the water level, according to the respective morphometric attributes.

ÍNDICE

Capítulo	Página
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - AVALIAÇÃO DO TERRENO	4
2.1 - PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES DO SOLO	10
3 - ATRIBUTOS E ÍNDICES MORFOMÉTRICOS	14
3.1 - ANÁLISE E DESCRIÇÃO DA VERTENTE	17
3.2 - MODELAGEM DE INFORMAÇÕES ALTIMÉTRICAS	18
3.3 - GRADIENTE, ORIENTAÇÃO E CURVATURA DAS VERTENTES	19
3.4 - CLASSIFICAÇÃO E COMPARTIMENTAÇÃO DO RELEVO A PARTIR DE INFORMAÇÕES ALTIMÉTRICAS	25
3.4.1 - ENTROPIA DA PAISAGEM	26
3.4.1.1 - DEFINIÇÃO FENOMENOLÓGICA DA ENTROPIA DA PAISAGEM	26
3.4.1.2 - DEFINIÇÃO ESTATÍSTICA DA ENTROPIA DA PAISAGEM	27
3.4.1.3 - ENTROPIA NA TEORIA DA INFORMAÇÃO	27
3.4.1.4 - ANALOGIA À PAISAGEM	29
4 - CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA	33
5. MODELAGEM DIGITAL E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DO TERRENO - GOIÂNIA	44
5.1. GERAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDE)	45
5.2. CARTAS DE DECLIVIDADE E ORIENTAÇÃO	50
5.3. CARTAS DE CURVATURA PLANA E DO PERFIL	53
5.4. CARTA DE ENTROPIA DO RELEVO	83
5.5. COMPARTIMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA	92
6. MODELAGEM DE DADOS DE INVESTIGAÇÕES DO SUBSOLO - GOIÂNIA	112
6.1. MODELAGEM NUMÉRICA DOS DADOS DE SONDAJENS GEOTÉCNICAS	115

6.2. DISTRIBUIÇÃO DE ATRIBUTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS NOS COMPARTIMENTOS DO TERRENO	119
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
3.1. Entropia da paisagem normalizada para áreas planas, colinas e altas montanhas.	31
5.1. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de geologia.	75
5.2. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de geologia.	76
5.3. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geologia e curvatura do perfil.	76
5.4. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e geomorfologia.	77
5.5. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geomorfologia e de curvatura do perfil (resolução de 100 m).	77
5.6. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de geomorfologia.	78
5.7. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de solos (resolução de 100 m) e de curvatura do perfil.	78
5.8. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de solos.	79
5.9. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de solos e de curvatura do perfil (resolução de 100 m).	79
5.10. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de geologia e de curvatura plana (resolução de 100 m).	80
5.11. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geologia e de curvatura plana.	80
5.12. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura plana e de geologia.	80
5.13. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de geomorfologia e de curvatura plana (resolução de 100 m).	81
5.14. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura plana (resolução de 100 m) e de geomorfologia.	81
5.15. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geomorfologia e de curvatura plana (resolução de 100 m).	82

5.16. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de solos e de curvatura plana (resolução de 100 m).	82
5.17. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura plana (resolução de 100 m) e de solos.	83
5.18. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de solos e de curvatura plana (resolução de 100 m).	83
5.19. Área das classes da carta de entropia.	87
5.20. Tabulação cruzada (%) entre as cartas de entropia e de declividade (a classe N.C. equivale à área não classificada na carta de entropia do relevo).	89
5.21. Tabulação cruzada (%) entre as cartas de declividade e de entropia (a classe N.C. equivale à área não classificada na carta de entropia do relevo).	89
5.22. Tabulação cruzada (em km ²) entre as cartas de entropia do relevo e de geologia.	89
5.23. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de entropia do relevo e de geologia.	90
5.24. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geologia e de entropia do relevo.	90
5.25. Tabulação cruzada (em km ²) entre geomorfologia e entropia do relevo.	90
5.26. Tabulação cruzada (em %) entre entropia do relevo e geomorfologia.	91
5.27. Tabulação cruzada (em %) entre geomorfologia e entropia do relevo.	91
5.28. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de solos e de entropia do relevo.	91
5.29. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de entropia do relevo e de solos.	92
5.30. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de solos e de entropia do relevo.	92
5.31. Área das classes na carta de declividade reclassificada para a área urbana, de expansão urbana e conurbada com Aparecida de Goiânia.	94
5.32. Área das classes hipsométricas reclassificadas da área de estudos, para a área urbana, de expansão urbana e conurbada com Aparecida de Goiânia.	97
5.33. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de geologia e de declividade.	98
5.34. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de declividade e de geologia.	98
5.35. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de geologia e de declividade.	99
5.36. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de geomorfologia e de declividade.	99
5.37. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de declividade e de geomorfologia.	100

5.38. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de geomorfologia e de declividade.	100
5.39. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de solos e de declividade.	101
5.40. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de declividade e de solos.	101
5.41. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de solos e de declividade.	101
5.42. Tabulação cruzada (em km ²) entre as áreas das classes de geologia e altimétricas.	102
5.43. Tabulação cruzada (em %) entre as áreas das classes de geologia e altimétricas.	102
5.44. Tabulação cruzada (em %) entre as áreas das classes altimétricas e de geologia.	103
5.45. Tabulação cruzada (em km ²) entre geomorfologia e altimetria.	103
5.46. Tabulação cruzada (em %) entre altimetria e geomorfologia.	104
5.47. Tabulação cruzada (em %) entre geomorfologia e altimetria.	104
5.48. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de solos e de altimetria.	105
5.49. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de altimetria e de solos.	105
5.50. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de solos e de altimetria.	106
5.51. Tabulação cruzada (em km ²) entre a geologia e orientação das vertentes.	106
5.52. Tabulação cruzada (em %) entre orientação das vertentes e geologia.	107
5.53. Tabulação cruzada (em %) entre geologia e orientação das vertentes.	107
5.54. Tabulação cruzada (em km ²) entre geomorfologia e orientação das vertentes.	107
5.55. Tabulação cruzada (em %) entre orientação das vertentes e geomorfologia.	108
5.56. Tabulação cruzada (em %) entre geomorfologia e orientação das vertentes.	108
5.57. Tabulação cruzada (em km ²) entre solos e orientação das vertentes.	108
5.58. Tabulação cruzada (em %) entre orientação das vertentes e solos.	109
5.59. Tabulação cruzada (em %) entre solos e orientação das vertentes.	109
6.1. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura do material inconsolidado e a curvatura do perfil (resolução 100m).	125
6.2. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a curvatura do perfil (resolução 100m).	125
6.3. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura do material inconsolidado e intervalos de altitude.	126

6.4. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e intervalos de altitude.	126
6.5. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura do material inconsolidado e a declividade.	127
6.6. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a declividade.	127
6.7. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura do material inconsolidado e a orientação das vertentes.	127
6.8. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a orientação das vertentes.	128
6.9. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura do material inconsolidado e a entropia do relevo.	128
6.10. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a entropia do relevo.	128
6.11. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura do material inconsolidado e a geologia.	129
6.12. Tabulação cruzada (em %) entre a geologia e a espessura do material inconsolidado.	129
6.13. Tabulação cruzada (em km ²) entre a geomorfologia e a espessura dos materiais inconsolidados.	129
6.14. Tabulação cruzada (em km ²) entre a espessura dos materiais inconsolidados e a geomorfologia.	130
6.15. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices N _{spt} a 4m e de curvaturas do perfil.	139
6.16. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices N _{spt} a 4m e as curvaturas do perfil.	140
6.17. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices N _{spt} a 4m e as classes de geologia.	140
6.18. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices N _{spt} a 4m e as classes de geologia.	140
6.19. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices N _{spt} a 4m e as classes de geomorfologia.	141

6.20. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de geomorfologia.	141
6.21. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de solos.	142
6.22. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de solos.	142
6.23. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de curvatura do perfil.	143
6.24. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de curvatura do perfil.	143
6.25. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de curvatura do perfil.	143
6.26. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de curvatura do perfil.	143
6.27. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geologia.	144
6.28. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geologia.	144
6.29. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geologia.	144
6.30. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geologia.	144
6.31. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geomorfologia.	145
6.32. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geomorfologia.	145
6.33. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geomorfologia.	145
6.34. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geomorfologia.	146
6.35. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de solos.	146

6.36. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices N _{spt} a 11m e as classes de solos.	146
6.37. Tabulação cruzada (em km ²) entre os intervalos de índices N _{spt} a 16m e as classes de solos.	147
6.38. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices N _{spt} a 16m e as classes de solos.	147
6.39. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de intervalos de profundidade do nível d'água (estação chuvosa) e de intervalos de altitudes.	150
6.40. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de intervalos de profundidade do nível d'água (estação chuvosa) e de intervalos de altitudes.	150
6.41. Tabulação cruzada (em km ²) entre as classes de intervalos de profundidade do nível d'água (estação seca) e de intervalos de altitudes.	150
6.42. Tabulação cruzada (em %) entre profundidades do NA (abril-setembro) e altitudes.	150
6.43. Tabulação cruzada (em km ²) entre profundidades do NA (estação chuvosa) e solos.	151
6.44. Tabulação cruzada (em %) entre profundidades do NA (estação chuvosa) e solos.	151
6.45. Tabulação cruzada (em km ²) entre profundidades do NA (estação seca) e solos.	151
6.46. Tabulação cruzada (em %) entre profundidades do NA (estação seca) e solos.	151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 - O processo de mapeamento facilitado pela tecnologia dos SIG, integrando coleta, edição, armazenamento, processamento e visualização do dado (modificado de Robinson et al., 1995).	5
3.1 - Extração de índices geomorfométricos elementares (modificado de Schimidt & Dikau, 1999).	15
3.2 - Formas geométricas das vertentes (modificado de Ruhe, 1975).	18
3.3 - Grade 3x3 das elevações, a partir de Horn (1981).	20
3.4. Diagrama dos valores de altitudes do polinômio ajustado à superfície do terreno, para o cálculo da curvatura (modificado de McCoy & Johnston, 2002).	22
3.5 - Padrões básicos de linhas de fluxo a partir de várias combinações da curvatura do gradiente ou do perfil, e curvatura do contorno ou plana (modificado de Huggett, 1975).	24
3.6 - (a) Função frequência $f(x)$ para uma variável contínua; (b) discretização de uma variável contínua (modificado de Zdenkovic & Scheidegger, 1989).	28
3.7 - Representação gráfica de distribuições contínuas de probabilidade em relação a maiores e menores incertezas (modificado de Mattos & Veiga, 2002).	29
3.8 - Frequências de altitudes empíricas para vários tipos de paisagens (da Jugoslávia). As seções dos mapas representam todas 24 km ² (modificado de Zdenkovic & Scheidegger, 1989).	31
4.1 - Localização do município de Goiânia, abrangendo a área de estudos, que compreende aproximadamente a área urbana, de expansão urbana e a área conurbada ao sul do município.	34
4.2 - Mapa geológico abrangendo a quase totalidade do município de Goiânia (modificado de Campos et al., 2003; escala do original 1:50.000).	35
4.3 - Mapa Geomorfológico do município de Goiânia, modificado de Casseti (1992). Escala da base cartográfica do original, 1:100.000.	36

4.4 - Carta hipsométrica do município de Goiânia (imagem resultante da "Shuttle Radar Topography Mission", da "U. S. Geological Survey, EROS Data Center", de maio de 2003, resolução de 90 m).	39
4.5 - Mapa de solos do município de Goiânia (modificado de IPLAN / IBGE / UFG, 1991, escala do original, 1:40.000), a legenda encontra-se expandida na Fig. 2.6.	40
4.6 - Legenda expandida do mapa de solos do município de Goiânia (modificado de IPLAN / IBGE / UFG, 1991).	41
4.7. Mapa de solos do município de Goiânia segundo a classificação da Embrapa/CNPS (1999), modificado de Campos et al. (2003), escala do original, 1:50.000.	42
5.1 - Esquema das curvas de nível compiladas na base de dados altimétrica do MUBDG - versão13 (COMDATA, 2001).	45
5.2 - Base cartográfica planialtimétrica da área urbana e de expansão urbana de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia, compilada no programa <i>ArcGis</i> 8.2.	46
5.3 - Detalhe de uma carta de declividade com destaque às distorções geradas na modelagem dos dados altimétricos.	49
5.4 - Carta de declividades das áreas urbana, de expansão urbana do município de Goiânia e conurbadas com Aparecida de Goiânia	51
5.5 - Carta de orientação das vertentes das áreas urbana, de expansão urbana de Goiânia e conurbadas com Aparecida de Goiânia.	52
5.6 - Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 5x5 m.	57
5.7 - Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 10x10 m.	58
5.8 - Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 25x25 m.	59
5.9 - Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 50x50 m, com limites dos polígonos generalizados.	60
5.10 - Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 100x100 m, com limites dos polígonos generalizados.	61

5.11 - Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 250x250 m, com limites dos polígonos generalizados.	62
5.12 - Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 5x5 m.	63
5.13 - Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 10x10 m.	64
5.14 - Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 25x25 m.	65
5.15 - Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 50x50 m, com limites dos polígonos generalizados.	66
5.16 - Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 100x100 m, com limites dos polígonos generalizados.	67
5.17 - Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 250x250 m, com limites dos polígonos generalizados.	68
5.18 - Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 5x5 m	69
5.19 - Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 25x25 m.	70
5.20 - Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 50x50 m.	71
5.21 - Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 100x100 m.	72
5.22. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura (%.m ⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 5x5m.	73
5.23. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura (%.m ⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 10x10m.	73
5.24. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura (%.m ⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 25x25m.	74
5.25. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura (%.m ⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 50x50m.	74

5.26. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura (%.m ⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 100x100m.	74
5.27. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura (%.m ⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 250x250m.	75
5.28 - Configuração da matriz de convolução de $k \times k$ elementos na área de estudos.	84
5.29. Carta de entropia do relevo, compartimentada segundo a distribuição das classes no histograma de frequências.	86
5.30 - Histograma das classes da carta de entropia do relevo, resolução espacial de 50m	87
5.31. Carta de declividades, compartimentos, área urbana e de expansão do município de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia, recorte segundo o retângulo localizado na Fig. 5.29.	88
5.32. Histograma representando a distribuição das áreas das classes de orientação segundo a quantidade de células, na área da pesquisa.	93
5.33. Histograma representando a distribuição das áreas das classes de declividade, áreas essas calculadas em km ² na área da pesquisa.	94
5.34. Carta de declividades, compartimentos, área urbana e de expansão do município de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia.	95
5.35. Carta hipsométrica, compartimentos, área urbana e de expansão do município de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia.	96
5.36 - Histograma mostrando a distribuição da frequência de altitudes da área de estudos, apresentando em destaque um ponto de inflexão da curva.	97
6.1 - Localização dos furos de sondagens do tipo SPT, sondagens rotativas, ensaios de infiltração e poços subterrâneos.	116
6.2 - Formulário construído para montagem e entrada dos dados no banco de dados de sondagens SPT (formulário relativo às descrições existentes nos boletins de sondagem).	117
6.3. Formulário construído para entrada dos dados no banco de dados de sondagens mistas (formulário relativo às descrições existentes nos boletins de sondagem).	117

6.4. Formulário construído para entrada dos dados no banco de dados de poços, disponibilizados em Campos et al. (2003).	118
6.5. Profundidade do impenetrável em metros, considerando como limite índices Nspt maiores do que 40 golpes. Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.	122
6.6. Profundidade do impenetrável em metros, considerando como limite índices Nspt maiores do que 40 golpes. Modelagem realizada segundo o método da krigagem ordinária.	123
6.7. Espessura do material inconsolidado onde as sondagens não atingiram o impenetrável, considerado como a camada com índices maiores que 40 golpes. Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.	124
6.8. Mapa de documentação da localização dos perfis geológicos em relação às sondagens referentes aos gráficos elaborados e à geologia.	131
6.9. Localização dos furos de sondagem do tipo SPT, cujos gráficos de variação do índice Nspt com a profundidade foram elaborados e do perfil geológico de número quatro.	132
6.10. Perfis geológicos esquemáticos da área de estudos.	133
6.11 - Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 4 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural.	134
6.12 - Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 6 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural.	135
6.13 - Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 11 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural. As áreas não classificadas se referem a sondagens que não atingiram os 11 metros.	136
6.14 - Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 16 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural. As áreas não classificadas se referem a sondagens que não atingiram os 11 metros.	137

6.15 - Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 20 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural. As áreas não classificadas se referem a sondagens que não atingiram os 11 metros.	138
6.16. Profundidade do nível d'água a partir da superfície do terreno para a estação seca, aquífero poroso. Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.	148
6.17. Profundidade do nível d'água a partir da superfície do terreno para a estação chuvosa, aquífero poroso. Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.	149
6.18. Localização dos focos de processos erosivos em relação à entropia do relevo, para a área em detalhe.	153
6.19. Gráficos relativos à sondagem 184.00/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.	154
6.20. Gráficos relativos à sondagem 63.01/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.	155
6.21. Gráficos relativos à sondagem 106/02/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.	156
6.22. Gráficos relativos à sondagem 111/01/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.	157

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	Superfície aplanainada
A _c	Área de contribuição específica
a	Área de contribuição
a4	Superfícies de formas aguçadas, com predomínio de declive de 20 a 40%
C	Cambissolo
C	Curvatura côncava
c1	Superfícies de formas convexas, com predomínio de declive de 0 a 5%
c2	Superfícies de formas convexas, com predomínio de declives de 5 a 10%
CG	Chapadões de Goiânia
COMDATA	Companhia de processamento de dados do município de Goiânia
CSIRO	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i>
CTI	Índice Topográfico Composto
d	Distrófico
DF	Distrito Federal
e	Eutrófico
E	Leste
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
et al.	entre outros
f_i	freqüência de aparecimento do elemento i
FV	Fundo de Vale
G	Gleissolo
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology</i>
IG	Instituto Geológico
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPLAN	Instituto de Planejamento Municipal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
l	Comprimento de fluxo
L	Curvatura retilínea
LE	Latossolo Vermelho Escuro
LV	Latossolo Vermelho Amarelo
LR	Latossolo Roxo

m	metro
M	massa
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MUBDG-v.13	Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia - Versão 13
N	norte
NA	Nível de água
N _{SPT}	Número de golpes do SPT
NW	Noroeste
p	Componente do vetor gradiente na direção do eixo y
Pck	Proterozóico - charnockitos
PDG	Planalto Dissecado de Goiânia
PE	Podzólico Vermelho Escuro
PEG	Planalto Embutido de Goiânia
Pf	Planícies fluviais
Pg1	Proterozóico - Granitóide Gama 1
Pg2	Proterozóico - Granitóide Gama 2
Pmgb	Proterozóico médio - Metagabro
Pmp	Proterozóico médio - Xisto
Pmqa	Proterozóico médio - Quartzitos Micáceos
PUCE	Padrão - Unidade - Componente - Avaliação
q	componente do vetor gradiente na direção do eixo x
Q	energia termal
Qa	Quaternário - aluvião
R	Superfície rampeada
R	Solos litólicos
s	segundo
S	Sul
S	Entropia
SAD	<i>South American Datum</i>
S_{apr}	Entropia (valor aproximado)
SE	Sudeste
SNLCS	Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos

SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGGO	Sistema de Informações Geográficas de Goiânia
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
t	Superfície de formas tabulares
T	Temperatura
tan	Tangente
Tf	Terraços fluviais
TIN	Grades Triangulares Irregulares
UBC	Unidade Básica de Compartimentação
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura
UTM	Universal Transversa de Mercator
V	Curvatura convexa
w	probabilidade de encontrar o sistema em determinado estado
W	oeste
z	altitude ou elevação
%	porcento
°	graus
η_{perfil}	curvatura do perfil
η_{plana}	curvatura plana
Φ	orientação da vertente
θ	ângulo de inclinação máxima da vertente

1. INTRODUÇÃO

A ocupação humana do meio físico pode trazer interferências que alteram o seu equilíbrio natural. A cartografia geotécnica surgiu ao tentar disponibilizar informações sobre o ambiente geológico, buscando a utilização do terreno com mínima interferência nesse equilíbrio. O entendimento da dinâmica do ambiente geológico permite direcionar formas de ocupação mais harmoniosas, tendo em vista os elementos que as condicionam. Daí a necessidade de se prover engenheiros, planejadores e projetistas com as informações que os auxiliem a minimizar os impactos decorrentes da implantação de obras de engenharia, bem como de outras formas de ocupação e desenvolvimento regional. Assim, a cartografia geotécnica visa subsidiar tanto o planejamento, projeto e construção, como manutenção e segurança de obras de engenharia. As abordagens operacionais da cartografia geotécnica partem da compreensão da interação entre os componentes do meio ambiente, o substrato rochoso; as feições geomorfológicas e a dinâmica superficial; os solos; as condições hidrogeológicas; as condições climáticas; a vegetação; e a utilização atual da terra (UNESCO/IAEG, 1976).

A cartografia geotécnica torna-se um instrumental tecnológico básico na determinação de diretrizes para o planejamento urbano e regional, ao utilizar diversas ferramentas que fundamentam a análise do meio físico, tais como a investigação de campo e laboratório, associados aos recursos de geoprocessamento no armazenamento e tratamento dos dados de investigação (Souza, 1995).

Na compreensão da interação entre os componentes do meio ambiente, a configuração da superfície do terreno consiste em uma das principais feições distinguíveis e de fácil mensuração, quando comparada a outras feições ambientais. Parte-se do princípio que, a partir dessas feições, pode-se delimitar unidades do terreno, advindas dessa interação, que reflitam a distribuição de propriedades, como aquelas dos solos e/ou do substrato rochoso.

Ao se delimitar as unidades do terreno, as técnicas de avaliação do terreno baseadas na caracterização de feições topográficas são fundamentadas em geral em produtos de sensoriamento remoto. Essas técnicas podem partir também da modelagem numérica digital da altimetria disponível em documentação cartográfica.

A hipótese de que a compartimentação morfométrica do terreno pode ser realizada a partir de modelagem de informações relativas à altimetria e que a morfometria possui relação com os atributos geotécnicos, consistiu na motivação principal da pesquisa, como expectativa de contribuição metodológica à cartografia geotécnica na elaboração de documentos cartográficos básicos. Também se partiu da hipótese que um confronto dessa modelagem com

dados de investigação do subsolo poderia fundamentar a compartimentação do terreno, os quais possibilitariam também a espacialização de características geotécnicas.

A área de estudos consiste na área urbana e de expansão urbana do município de Goiânia. A escassez de exposições naturais da superfície em regiões intensamente ocupadas, e conseqüente falta de documentação cartográfica sobre o meio físico dessas áreas, motivou a realização da presente pesquisa em área urbana, uma vez que se observa a dificuldade de mapeamento da distribuição de propriedades do solo nessas regiões. O interesse pela área escolhida também reside no fato de Goiânia configurar-se como uma cidade relativamente nova, com um rápido processo de expansão urbana e ocorrência de conurbações, como é o caso de seu limite sul, além de apresentar problemas relativos à ocupação desordenada de determinadas feições de relevo. Dentre esses problemas estão aqueles que se referem à ocupação inadequada de fundos de vale e à aceleração e deflagração de processos erosivos, destacados pelo IPLAN (1992) e por Nascimento & Podestá Filho (1993).

Desse modo, o objetivo central desta pesquisa consiste em se contribuir metodologicamente com a cartografia geotécnica quanto à análise da distribuição espacial de atributos do terreno, com base na modelagem de dados altimétricos e em sondagens geotécnicas do tipo SPT. Para se atingir o objetivo central, a pesquisa teve como objetivos secundários a extração de informações morfométricas do terreno, a análise da entropia do relevo da região e a geração de um banco digital de dados alfanuméricos georreferenciados, com dados existentes relativos à investigação do terreno na área de pesquisa. Para o entendimento da distribuição de atributos geotécnicos parte-se principalmente de relatórios de sondagens de simples reconhecimento (SPT), disponibilizados por empresas de engenharia atuantes na região. E na análise morfométrica utiliza-se a base de dados planialtimétricos digitais cedida pela Prefeitura de Goiânia (MUBDG v.13), a qual abrange a área urbana e de expansão urbana do município de Goiânia, e parte da área conurbada com Aparecida de Goiânia. Devido à resolução da base de dados altimétrica a escala de alguns dos produtos cartográficos elaborados (carta hipsométrica, de declividade e de orientação das vertentes) é compatível com a escala de 1:20.000.

A tese abrange sete capítulos. Após o primeiro capítulo introdutório, o capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos sobre a metodologia de avaliação de terrenos, enfatizada dentre as metodologias de cartografia geotécnica, nesse capítulo são também destacados os fundamentos da predição de propriedades do solo, definidas a partir de unidades geomorfológicas. No capítulo 3, os conceitos relativos à análise e à modelagem geomorfométrica são apresentados, finalizando o capítulo com a abordagem dos conceitos de

entropia da paisagem. O capítulo 4 contextualiza fisiograficamente o município de Goiânia no qual se insere a área de estudos. O capítulo 5 trata dos materiais e métodos utilizados na modelagem dos dados altimétricos e posterior geração e análise dos documentos cartográficos, como as cartas de declividade, orientação, curvaturas e de entropia do relevo. No capítulo 5 o último item apresenta a compartimentação da área segundo a morfometria da área de estudos. Seguido pelo capítulo referente às conclusões e sugestões para trabalhos futuros, o capítulo 6 trata dos aspectos da construção do banco de dados georreferenciados e a modelagem da distribuição de propriedades dos solos existentes na área de estudos, em confronto com a morfologia do terreno.

2. AVALIAÇÃO DO TERRENO

Como já mencionado, a cartografia geotécnica surgiu a partir da necessidade de prover engenheiros, planejadores e projetistas com mapas que auxiliassem tanto no projeto quanto na interpretação dos resultados das investigações. O ambiente geológico é complexo para ser representado em sua totalidade em um mapa geotécnico e deve, por isso, ter os seus fatos simplificados. O grau de simplificação depende principalmente da finalidade e escala do mapa, da importância relativa dos fatores geotécnicos, da precisão da informação e das técnicas de representação utilizadas (UNESCO/IAEG, 1976).

De acordo com Robinson et al. (1995), todos os mapas dizem respeito a dois elementos da realidade, as localizações e os atributos. Localizações são posições no espaço bidimensional, como coordenadas x e y, e atributos são qualidades ou magnitudes. A partir da relação entre esses dois elementos básicos, podem ser identificadas e derivadas diversas propriedades topológicas e métricas, tais como distâncias, direções, adjacências, padrões, redes e interações. Um mapa é, por conseguinte, uma ferramenta de análise espacial.

Um mapa ou carta pode ser entendido como uma representação da realidade espacial, a qual é contínua e sujeita a estruturas complexas de dependência espacial. Deste modo, a modelagem de dados espaciais, realizada por meio de técnicas cartográficas, obedece a estruturas lógicas na representação das variações de determinadas propriedades em superfície e subsuperfície. E, como consiste em uma aproximação da realidade, a escolha do modelo de representação é uma etapa fundamental.

A modelagem realizada na elaboração de mapas é favorecida pela utilização de ferramentas de geoprocessamento, principalmente a partir da tecnologia dos sistemas de informações geográficas (SIG), os quais viabilizam operações de coleta, armazenamento, processamento e apresentação de informações georreferenciadas (Fig.2.1.).

Na etapa inicial do processo de mapeamento, métodos de seleção e generalização são aplicados. A generalização se faz necessária com o processo de redução da realidade para a escala de um mapa. E a seleção é o processo intelectual de decisão das classes de feições necessárias para servir àquela determinada finalidade do mapa. Na teoria não são realizadas modificações, a escolha está em determinada feição ser ou não incluída no mapa. A cartografia digital permite experiências no processo de seleção. Uma vez que as feições estejam disponíveis pode-se visualizar o conjunto e decidir sobre a quantidade de informação necessária e adequada àquela escala. Uma vez que o cartógrafo tenha selecionado as feições e

atributos para o mapeamento, a próxima etapa faz parte das operações de generalização (Robinson et al., 1995).

Ao se discutir sobre generalização cartográfica é importante definir quatro termos: classificação, simplificação, exagero, simbolização. Além destes quatro processos, a modelagem da realidade pode incluir inferências dos relacionamentos entre feições do mapa, como por exemplo, a construção de curvas de isovalores a partir de operações de interpolação (Robinson et al., 1995).

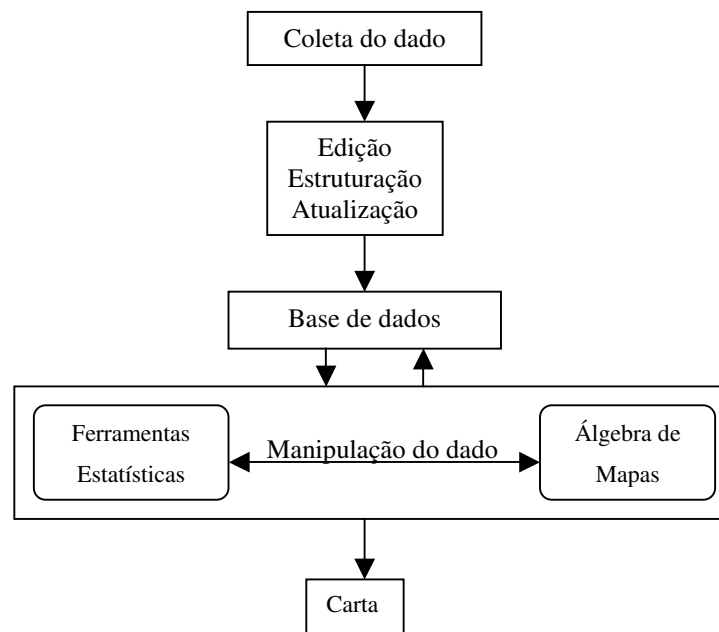


Figura 2.1. O processo de mapeamento facilitado pela tecnologia dos SIG, integrando coleta, edição, armazenamento, processamento e visualização do dado (modificado de Robinson et al., 1995).

A discussão sobre a escala de um mapa evoluiu com o avanço das tecnologias computacionais. No passado, a escala do mapa influenciava grandemente o seu conteúdo e resolução dos dados. Já as bases de dados digitais teoricamente não possuem escala. A escolha do conteúdo e resolução do dado digital relacionada à escala pode ser feita no momento da elaboração do produto cartográfico específico. Num sentido prático, entretanto, a escala ainda é um fator crítico dentro de uma base de dados digital. A resolução da base de dados digital coletada diretamente do campo é determinada pela resolução dos instrumentos utilizados. Quando os dados são digitalizados a partir de mapas existentes, o conteúdo e resolução das informações resultantes são influenciados pela resolução e forma de manipulação dos instrumentos de digitalização, e pela própria resolução do documento

cartográfico existente (Robinson et al., 1995). Em relação ao formato digital, deve-se observar a precisão da fonte dos dados primários ou secundários (obtidos a partir de dados existentes), que pode ser entendida como a precisão dos processos de digitalização das cartas, quando em formatos analógicos. Quando se tratam de dados digitais, desaparece o erro gráfico.

Baseado em Libault (1975), pode-se afirmar que a escala de um mapa é a relação entre dois valores de dimensões lineares. Levando-se em conta essa definição restrita, de caráter linear, Albrecht e Car (1999), abordando um conceito ecológico na análise de padrões, afirmam que a resolução espacial e a extensão da área de estudos podem ser entendidas como componentes da escala. Segundo a UNESCO/IAEG (1976), os mapas são classificados em mapas de grande escala, quando em escalas de 1:10.000 a maiores; em média escala, quando em escalas entre 1:10.000 e 1:100.000; e em pequena escala, quando em escalas de 1:100.000 a menores.

A partir de Varnes (1974), genericamente pode-se afirmar que mapa geotécnico é um mapa que requer, para sua realização, operações específicas de adição, seleção, generalização e transformação das informações espaciais relativas à litologia e estrutura dos solos e rochas, hidrologia, geomorfologia e processos geodinâmicos. Para a UNESCO/IAEG (1976), um mapa geotécnico é um quadro simplificado criado a partir do sistema que compreende aqueles componentes importantes do ambiente geológico, ou seja, a distribuição e propriedades das rochas e solos, água subterrânea, características do relevo e processos geodinâmicos atuais.

A cartografia geotécnica pode ser realizada a partir de diversas metodologias, o que depende das características específicas dos locais, escala de abordagem e finalidade a que se propõe. Podem-se citar princípios metodológicos mais globais, como aqueles da IAEG (UNESCO/IAEG, 1976) e do programa PUCE (Padrão - Unidade - Componente - Avaliação) para avaliação do terreno (Grant, 1975).

Dentre as metodologias utilizadas na cartografia geotécnica, a metodologia de avaliação do terreno é aqui destacada pela ênfase dada à morfologia da superfície. A avaliação do terreno informa sobre a probabilidade de ocorrência de um conjunto de condições específicas, em um determinado local. O resultado é a divisão do terreno em classes. Uma classe do terreno pode ser caracterizada a partir da delimitação das feições do terreno. A configuração do terreno pode ser considerada como o nível básico de entendimento de uma região. E o terreno, como o produto da interação entre a geologia e o clima, tendo o tempo como operador (Grant, 1975; Grant & Finlayson, 1978). Para Vita (1984), a forma do terreno consiste em um elemento da paisagem formado por determinado processo geológico, com forma característica na superfície (tais como topografia e padrões de drenagem) e variações

típicas de propriedades geotécnicas, incluindo distribuições características de solo, tais como umidade e textura. São exemplos típicos de feições do terreno, as dunas de areia e as planícies de inundação, em que cada um tem formas características na superfície que podem ser identificadas por observação de campo e fotografia aérea ou outras técnicas de interpretação de produtos de sensoriamento remoto. As distribuições das propriedades geotécnicas são variáveis de acordo com a configuração do terreno por causa das diferenças climáticas, taxas de intemperismo e processos, além do tipo de substrato rochoso.

As técnicas de avaliação de terreno fundamentam-se na morfometria das feições topográficas. São identificadas regiões do terreno distinguíveis das demais por elementos como forma, posição topográfica e inclinação da vertente; amplitude do relevo; frequência e organização de canais de drenagem. O estudo dos padrões de drenagem permite uma melhor correlação da morfologia do terreno com a litologia. E a caracterização e descrição das vertentes, associadas aos canais fluviais, auxiliam tanto na análise dos processos de dinâmica superficial, como podem refletir os materiais de cobertura e o substrato rochoso. Contudo, além da relação existente entre as formas de relevo e a configuração da drenagem com a litoestrutura, existe a dependência desses com as condições climáticas, no que se refere a sua resistência à erosão. O mesmo litotipo pode exibir diferentes feições dependendo das condições climáticas. O calcário, por exemplo, pode apresentar feições positivas em clima semi-árido ou ausência de ressaltos em climas quentes superúmidos (IBGE, 1998).

A sistematização da extração e conseqüente manipulação de índices morfométricos, visando a compartimentação do terreno em regiões homogêneas, pode partir da análise de produtos de sensoriamento remoto, como fotografias aéreas verticais e imagens orbitais, ou de modelagem de informações altimétricas do terreno, como curvas de nível e pontos cotados.

No estabelecimento de regiões homogêneas quanto à morfometria de feições topográficas, as etapas consistem inicialmente na delimitação e atribuição posterior de significados geológico-geomorfológicos às respectivas regiões. Quando produtos de sensoriamento remoto são utilizados, as regiões homogêneas podem ser aglutinadas ou subdivididas a partir da interpretação de uma ou mais propriedades, como a orientação, assimetria e densidade de textura do relevo (Soares & Fiori, 1976).

O programa PUCE (Padrão - Unidade - Componente - Avaliação) desenvolvido pela CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*), na Austrália, é baseado na utilização sistemática de produtos de sensoriamento remoto na avaliação do terreno. A metodologia PUCE possui um caráter abrangente, esquemático e hierárquico de avaliação, baseado em identificação de feições facilmente reconhecíveis na paisagem. A base

da metodologia é que qualquer área do terreno pode ser classificada a partir de sua topografia, rocha, solo e vegetação. Essa metodologia permite a definição de classes de terreno em província, padrão do terreno, unidade de terreno e componente de terreno, relacionadas à fisiografia. São quatro níveis de generalização: o componente de terreno, indivisível, é o nível de maior escala; a unidade de terreno, o padrão de terreno e a província, nessa ordem, são compostos de uma associação limitada e repetitiva de membros das classes precedentes (Grant, 1975, Grant & Finlayson, 1978).

O componente de terreno pode ser mapeado em escalas de 1:2.000 a 1:5.000, definindo-se por possuir características tais como: microtopografia uniforme no que se refere à curvatura da vertente (retilínea, côncava ou convexa); litologia uniforme em um mesmo ambiente estrutural; e uma associação de solos que pode ser representada por camadas uniformes quanto à determinada classificação; e uma associação característica de vegetação, sem descontinuidades. A unidade de terreno, em geral mapeada em escalas de 1:10.000 a 1:25.000, pode ser definida como uma associação limitada de componentes do terreno, repetindo-se em uma mesma relação espacial, formando feições distintas e reconhecíveis. Contém, por conseguinte, associações de solo e vegetação características, sendo classificada por meio da configuração da superfície, topograficamente definida em classes com associações características de declividade e amplitude de relevo local (por exemplo, uma superfície erosiva ou deposicional, vertentes suaves ou colinas suaves); e secundariamente pelo perfil de solo dominante, e formação vegetal. O padrão de terreno, em geral mapeado nas escalas de 1:100.000 a 1:250.000, pode ser definido como uma associação limitada de unidades de terreno, a qual forma diferentes paisagens, sendo identificado por formas de terreno específicas, com topografia, associações de solo e associações de vegetação nativa repetitivas. O padrão de terreno tem ainda uma amplitude máxima de relevo local, padrão de drenagem característico e uma densidade de drenagem uniforme. Por sua vez, a província consiste em uma associação limitada de padrões de terreno, subordinada a um conjunto de rochas, com a geologia constante em relação ao Grupo, podendo em geral ser determinada a partir de mapas geológicos em escalas de 1:250.000 ou menores. Segundo este programa, o clima não é contemplado diretamente nos critérios de definição das classes, porque as mudanças climáticas refletem nas variações da topografia, solo e vegetação (Grant, 1975, Grant & Finlayson, 1978).

O trabalho de Oliveira & Lollo (2001) pode ser citado como exemplo da aplicação, no Brasil, da metodologia de avaliação do terreno para caracterização do meio físico em área urbana. Foi realizado um zoneamento da área urbana de Ilha Solteira (SP), quanto ao

comportamento das unidades de materiais inconsolidados, frente ao processo de colapso do solo. O zoneamento foi realizado até a identificação do nível hierárquico de elemento do terreno. Dados de sondagens de simples reconhecimento foram utilizados na confirmação da definição dos limites dos elementos de terreno, tendo sido constatado que os elementos de terreno identificados apresentaram diferentes perfis de alteração de materiais inconsolidados quanto ao seu comportamento colapsível.

Para finalidade de caracterização do processo erosivo e elaboração da carta de susceptibilidade à erosão na Bacia do Córrego Prosa (Campo Grande – MS), Mauro & Lollo (2001), a partir da avaliação da influência dos fatores intervenientes, também envolvendo a avaliação do terreno, identificaram as feições do terreno até o nível hierárquico de elemento do terreno. A avaliação do terreno foi conduzida a partir da interpretação de fotografias aéreas existentes na escala de 1:8.000, folhas topográficas na escala de 1:10.000 e trabalhos de campo.

Collares & Lorandi (1995) apresentam uma caracterização de materiais inconsolidados na compartimentação geotécnica da região de Bragança Paulista (SP), recorrendo para tal caracterização aos perfis de alteração e à análise do terreno com o uso do conceito de "*landforms*", na representação das variáveis verticais e compartimentação das unidades. Tal compartimentação permitiu a Collares & Lorandi (1995) a conjugação espaço-temporal dos materiais intemperizados com as outras características do meio físico, possibilitando o direcionamento das extrapolações e a delimitação das ocorrências homogêneas.

Do mesmo modo, Zuquette & Pejon (1996) adotaram o conceito de que as feições do terreno se referem a elementos do meio físico que possuem composição litológica definida, assim como variações das características visuais e físicas, tais como a forma topográfica e modelo de drenagem. Tais autores sugerem o mapeamento das feições do terreno a partir das características semelhantes morfológicas e morfométricas que refletissem as mesmas condições genéticas. Para Zuquette e Pejon (1996), as feições do terreno permitem ao mapeador a análise de alguns aspectos como: a covariação dos atributos, a validade das extrapolações, a impossibilidade quanto às interpolações e o controle espacial dos atributos. No caso dos solos tropicais, Zuquette e Pejon (1996) afirmam que se deve levar em conta a presença de espessos mantos de alteração, destacando, no entanto, que para o caso em que se aplicou a técnica em questão, os resultados se mostraram satisfatórios, reforçando a importância dessa técnica de investigação.

Princípios para a compartimentação fisiográfica, voltada para avaliação de terrenos são também aplicados em trabalhos realizados pelo Instituto Geológico - IG/SP - com base na delimitação de Unidades Básicas de Compartimentação (UBC). As UBC consistem nas menores unidades de análise, e são obtidas a partir de interpretação de produtos de sensoriamento remoto (Brollo et al., 2002).

2.1. PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES DO SOLO

Conforme comentado anteriormente, o uso de critérios topográficos é favorecido na distinção de unidades básicas de terreno porque a configuração da superfície, a principal feição distinguível das formas de terreno, é mais facilmente percebida e medida do que outras feições ambientais. Apesar desses méritos, permanecem dúvidas acerca da eficácia geral da abordagem. A questão é levantada na determinação do grau de correlação entre as variáveis principais (indicadores), utilizadas na distinção de unidades de levantamento, e as variáveis secundárias (complementares), inferidas a partir dos indicadores. Briggs & Shishira (1985), nesse contexto, afirmam que a confiabilidade das unidades de levantamento, definidas geomorfologicamente como indicadores de propriedades do solo depende, entre outros requisitos, da escala de análise na qual as unidades são definidas.

Dependendo da escala de análise, a variação dessas propriedades pode ser considerada abrupta ou gradual. Abrupta, quando as propriedades são consideradas homogêneas dentro de unidades com limites definidos, e gradual, quando são representadas por uma superfície contínua (Burrough, 1991).

Com base em unidades hierarquicamente definidas, Briggs & Shishira (1985) discorrem sobre aquelas de menores dimensões na superfície do terreno, indivisíveis (*landfacets*), uniformes em suas feições superficiais e facilmente reconhecíveis, como a forma da vertente; e no agrupamento dessas unidades que se repetem em situações geomorfologicamente similares (*landclass*).

Briggs & Shishira (1985) analisaram a validade das unidades definidas geomorfologicamente, a partir da utilização de fotografias aéreas e investigação de campo, acompanhada de amostragens e ensaios para a determinação de propriedades do solo (como pH, capacidade de troca catiônica, granulometria, entre outros). As unidades indivisíveis, as facetas (*landfacets*), foram delimitadas a partir da configuração da vertente e condições de superfície, caracterizadas por materiais superficiais uniformes e vertentes quase planas ou regularmente curvas. Os limites para as facetas do terreno foram definidos pelo ângulo da vertente (para unidades planares) ou pela taxa de variação do gradiente (para unidades

curvas). Essas unidades indivisíveis foram então agrupadas em classes do terreno (*landclass*), baseado na morfologia e condições da paisagem, como a posição topográfica em relação a outras unidades.

Para Briggs & Shishira (1985), apesar das limitações, as unidades de pesquisa geomorfologicamente definidas têm a vantagem de serem reproduzíveis e facilmente reconhecíveis, atuando como uma base útil para o mapeamento de solos. Mas, onde o grau de variabilidade local é alto, em relação à variabilidade regional, as classes do terreno têm capacidade discriminante limitada. Em relação à amostragem do solo, o fato de os coeficientes de variação, para diferentes propriedades do solo, diferirem marcadamente, implica que para se avaliar adequadamente as condições de solo são necessários diferentes números de amostras para cada propriedade do solo. Pois, somente assim se alcançaria a mesma resolução na definição de unidades. Entretanto, Briggs & Shishira (1985) concordam com o fato de que em alguns casos, o tamanho da amostra necessário para se alcançar o nível especificado de confiança seria proibitivamente grande. Por outro lado, a presença de autocorrelação espacial de propriedades do solo, possibilita menor tamanho de amostra, se técnicas de análise do semivariograma são aplicadas, a partir de uma amostragem de reconhecimento.

Quanto à escala de investigação, Mckenzie & Ryan (1999), baseados em Webster (1997), afirmam que a utilidade de métodos geoestatísticos em escalas intermediárias (de 1:50.000 a 1:100.000) é menos evidente do que em grandes escalas e que os métodos de pesquisa convencionais são aparentemente mais eficientes em escalas menores, por serem baseados em feições ambientais facilmente reconhecíveis, relacionadas às propriedades do solo. Entretanto, Mckenzie & Ryan (1999) também afirmam que esses relacionamentos são derivados de modelos mentais qualitativos e complexos, desenvolvidos pelos pedólogos em pesquisas de campo, existindo assim a necessidade de métodos de pesquisa quantitativos aplicáveis a escalas intermediárias, com a possibilidade de integrar métodos de pesquisa convencionais e quantitativos.

Mckenzie & Ryan (1999) propõem então testar a possibilidade de atributos quantitativos refletirem a variação do solo em uma região no sudeste da Austrália, cujo modelo resultante pode ser combinado a várias formas de krigagem. Dentre os atributos disponíveis apresentados para predição espacial, por Mckenzie & Ryan (1999), destaca-se entre outros, índices como altitude, orientação, gradiente, curvatura plana, curvatura no perfil, área de contribuição, área de contribuição específica, área de dispersão, área de dispersão específica, e índice topográfico composto. O índice topográfico composto (CTI), também

denominado de índice topográfico de umidade, foi utilizado como uma das variáveis do modelo por se considerar um índice importante no controle do fluxo de água e sedimentos. Esse índice quantifica a posição de um local na paisagem, auxiliando na predição das propriedades do solo, e pode ser definido como (Eq.2.1):

$$CTI = \ln (A_c / \tan \theta) \quad (2.1)$$

Onde, A_c = área de contribuição específica, expressa em m^2 por unidade de largura ortogonal à direção de fluxo, em metros; e $\tan \theta$ = declividade ou gradiente da vertente.

Correlações foram realizadas por McKenzie & Ryan (1999) para gerar um modelo de profundidade do solo, a partir dos índices citados. Como exemplo de correlações apresentadas tem-se que: a) solos sobre vertentes mais íngremes (>5% de inclinação) tendem a ser mais raso do que aqueles localizados em vertentes mais suaves (<5% de inclinação); b) para inclinações < 5%, terrenos com CTI's menores (<10,3) tendem a apresentar solos mais rasos, sobre vertentes divergentes; ao contrário, para mesmas inclinações, os terrenos com CTI's maiores que 10,3, tendem a apresentar fluxos convergentes, com solos mais profundos.

Ressalvas são apresentadas por McKenzie & Ryan (1999), como aquelas observadas em unidades de paisagem mais antigas, onde o forte intemperismo pode obliterar a relação entre solos e formas do terreno atuais. Pois, em algumas paisagens o relacionamento entre solos e a geometria da frente de intemperismo subjacente pode ser mais significativa do que a morfometria da superfície. De igual modo, a presença de camadas em pequenas profundidades podem influenciar mais as propriedades em superfície que camadas mais profundas, e a presença de estruturas geológicas tais como diques e sils podem controlar os padrões em superfície e as condições hidrológicas da vertente. Nesse caso, nas circunstâncias em que a variação das propriedades do solo ocorre sem apresentar correlações com as propriedades ambientais facilmente reconhecíveis na paisagem, existe a necessidade de amostragem mais detalhada.

Análises sobre a variabilidade de propriedades do solo em profundidade foram realizadas por Sinowski & Auerswald (1999), os quais partem do princípio de que as unidades homogêneas de solo são mapeadas principalmente de acordo com propriedades do solo encontradas próximas à superfície, podendo ser heterogêneas em maiores profundidades. Sinowski & Auerswald (1999) objetivaram mostrar, a partir de uma análise discriminante, a profundidade no solo onde o material de origem muda, classificando os respectivos horizontes.

Pode ser citado, de igual modo, o exemplo de Hermuche et al. (2003), os quais realizaram processamentos de imagens digitais morfométricas na delimitação de algumas unidades de solo existentes na Bacia do Rio Jardim (DF). A metodologia aplicada permitiu a constatação de que o tipo de solo está diretamente ligado ao relevo, caracterizando padrões homogêneos de unidades pedológicas e fisiográficas.

3. ATRIBUTOS E ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

A geomorfometria (ou simplesmente morfometria) é definida como a caracterização numérica de formas topográficas. A grande variação de métodos e atributos morfométricos apresenta a necessidade de um sistema incluindo diferentes técnicas e métodos de classificação das formas de terreno em um esquema que seja capaz de gerar os índices ("*parameters*") de uma superfície contínua (Schimidt e Dikau, 1999).

Segundo Schmid & Dikau (1999), recentes avanços em tecnologias computacionais e de sensoriamento remoto revolucionaram a geomorfometria, avanços esses impulsionados pelo desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e dos Modelos Digitais de Elevação (MDE). Os SIG, que implementaram algoritmos geomorfométricos (como é o caso daqueles desenvolvidos para o cálculo da inclinação da vertente) são agora ferramentas comuns na análise do terreno. Contudo, a aplicação dessas técnicas e ferramentas altamente avançadas deve estar baseada em fundamentações teóricas relativas à geomorfometria.

Os componentes morfométricos fundamentais são os pontos geomorfométricos e os objetos geomorfométricos. As superfícies tridimensionais topográficas podem ser definidas medindo-se a altitude da superfície em cada coordenada. Conseqüentemente, toda superfície consiste de uma determinada quantidade de pontos geomorfométricos infinitesimais. O ponto geomorfométrico pode então ser definido como o “elemento básico da geomorfometria”. Já os elementos bidimensionais e lineares da superfície do terreno podem ser definidos como objetos geomorfométricos. Eles contêm certas quantidades de pontos geomorfométricos (Schimidt e Dikau, 1999).

Os objetos geomorfométricos podem ser derivados por agrupamentos (*clustering*) de pontos na superfície ou por combinação de áreas ou linhas predefinidas. O processo de agrupamento requer conhecimento geomorfológico de tal maneira que os objetos produzidos tenham o máximo de homogeneidade interna, como as formas de terreno, e/ou mostrem uma certa estrutura, como os segmentos de uma vertente (Schimidt e Dikau, 1999).

Por sua vez, os pontos e objetos geomorfométricos podem ser descritos por índices geomorfométricos (de forma quantitativa) ou por atributos geomorfométricos (de forma qualitativa). Tal caracterização significa que os mesmos nomes ou quantidades similares são atribuídos a formas similares. Geralmente, um ponto geomorfométrico é descrito por índices tais como altitude, inclinação, orientação e curvatura. Já os objetos são freqüentemente

caracterizados por termos qualitativos, como por exemplo, sopé da vertente, crista, canais de segunda ordem ou rede dendrítica (Schmidt e Dikau, 1999).

Desta forma, um objeto geomorfométrico é uma unidade da forma do terreno claramente definida e pode ser subdividido em duas subclasses principais, linear e bidimensional. Sua delimitação parte da análise dos índices elementares. Os métodos incluem classificação, filtragem e análise estrutural aplicada a uma matriz de índices geomorfométricos elementares.

Evans (1972) descreveu os índices geomorfométricos elementares, que podem ser diferentes em cada ponto de uma superfície morfométrica. Existe uma segunda classe de índices, como o comprimento da trajetória de fluxo (em uma determinada área de drenagem), o qual descreve a localidade do ponto em relação ao objeto morfométrico (linha de drenagem ou divisor de águas). Uma terceira classe de índices, que são fisicamente baseados em modelos de processos, abrange combinações dos dois outros índices mencionados. A Fig. 3.1 ilustra diferentes possibilidades para extração de índices elementares, que podem ser calculados por meio de um algoritmo de uma matriz de convolução, utilizando o ponto como centro. As vizinhanças mais próximas são utilizadas no cálculo. Já os índices complexos são derivados da análise de toda a matriz de dados e de certa forma descrevem a localização topológico-morfométrica do ponto. Índices combinados são calculados por meio de uma função analítica a partir dos outros dois tipos de índices mencionados.

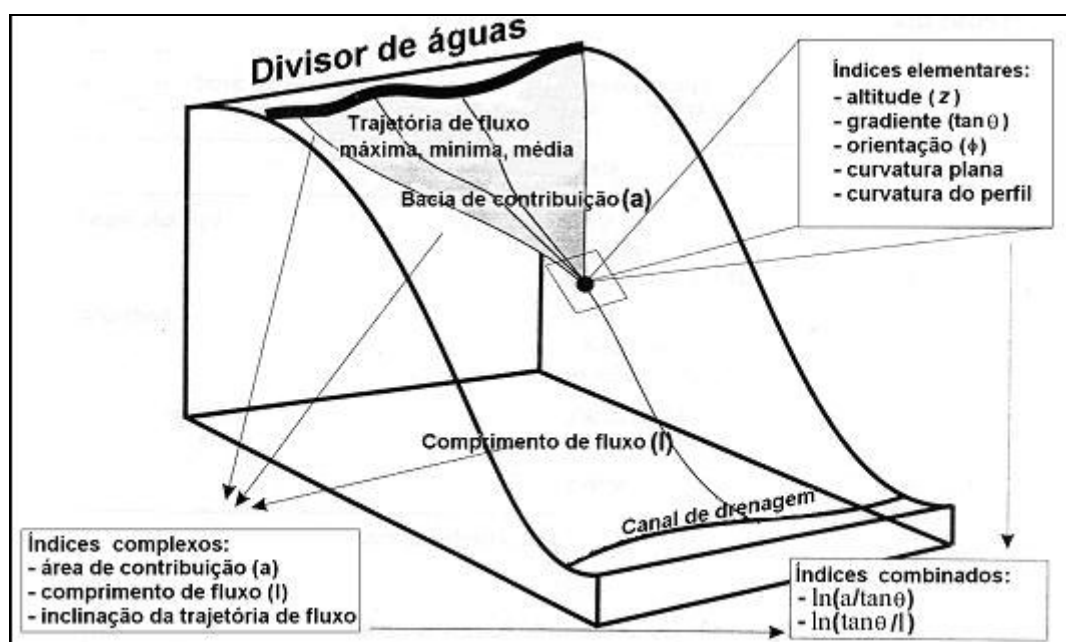


Figura 3.1. Extração de índices geomorfométricos elementares (modificado de Schmidt & Dikau, 1999).

Os índices elementares podem ser utilizados diretamente na modelagem de processos. Por exemplo, o gradiente e orientação da vertente podem ser utilizados para estimativa da energia de transporte de material. Os atributos combinados descrevem e caracterizam a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem, tais como a distribuição da umidade do solo ou o potencial à erosão laminar e linear. Os índices combinados podem ser utilizados na modelagem de processos muito complexos, hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. Pode-se, por exemplo, prever a distribuição espacial de diferentes espécies de plantas a partir do uso de índices de umidade e radiação solar, pois em muitos casos não é possível executar medidas diretas destes processos ambientais por limitações físicas, de tempo ou econômicas. Os dados de elevação são em geral acessíveis e, a partir da análise do terreno, os atributos geomorfométricos podem ser calculados. Também é comum, nos levantamentos ambientais, a escassez de dados básicos referentes ao meio físico, adequados à escala de análise. E, principalmente em áreas urbanas, tem-se a disponibilidade de dados topográficos. Logo, a partir dos dados de elevação, atributos geomorfométricos podem ser calculados e utilizados em monitoramentos hidrológicos e de investigações de perfis de solos (Moore et al., 1991).

A importância para a hidrologia do cálculo dos índices elementares pode ser destacada. O cálculo da altitude torna-se relevante em análises referentes à energia potencial do relevo; o gradiente relaciona-se à velocidade do fluxo superficial e subsuperficial; o cálculo da curvatura do perfil, a qual influencia diretamente na aceleração do fluxo, permite inferências quanto à taxa de erosão e deposição; bem como o cálculo da curvatura plana possibilita análises quanto à convergência ou divergência do fluxo e, conseqüentemente, quanto à umidade do solo subjacente. Ainda, índices complexos, como o comprimento da trajetória de fluxo (distância máxima de fluxo de água para um ponto na bacia de contribuição), podem estar relacionados à taxa de erosão e produção de sedimentos (Moore et al., 1991).

Exemplos de ferramentas disponíveis em programas de geoprocessamento (GRASS, ARC/INFO e DGRM) são apresentados em Schimidt e Dikau (1999). Tais ferramentas realizam funções de classificação e filtragem, no estabelecimento de unidades ou elementos do terreno, no cálculo de objetos lineares, como segmentos de canais, divisores de água e elementos que descrevem a trajetória do fluxo; bem como no cálculo de objetos bidimensionais, como área de contribuição acima de um determinado ponto. As limitações a aplicações efetivas da utilização desses programas, de acordo com Schimidt e Dikau (1999),

estão na estrutura fechada de métodos e ferramentas, permitindo somente parcialmente o desenvolvimento de novos algoritmos.

3.1. ANÁLISE E DESCRIÇÃO DA VERTENTE

Segundo Schmidt & Dikau (1999), as primeiras abordagens científicas, visando a classificação e a análise das formas topográficas, foram realizadas por Albrecht Penk (1894, 1896) e por Passarge (1912). Por se constituir em interface, resultado da interação entre a litosfera, a atmosfera e a hidrosfera, sustentando assim as atividades humanas, o relevo da superfície da Terra tem sido analisado a partir da caracterização da vertente quanto a sua forma, seu substrato rochoso e sua dinâmica (Moreira & Pires Neto, 1998). Em relação a sua geometria, uma vertente pode ser entendida como um segmento do relevo de inclinações variadas, enquadrando parte dos vales, tendo como limites cristas e talwegues.

De acordo com Ruhe (1975), uma vertente (*hillslope*) pode ser descrita por três componentes geométricos, o gradiente, que se define como sua inclinação em relação ao plano horizontal, medida de forma perpendicular à curva de nível; o comprimento (*slope length*), medido ao longo da linha de maior inclinação; e a largura (*slope width*), a qual é medida de forma perpendicular ao comprimento, paralelo às curvas de nível. A vertente pode ser retilínea ou curva ao longo do comprimento e/ou largura. A sua forma lateral é expressa pela forma de seu contorno e pelas relações do seu comprimento com a sua largura. Além dos três componentes geométricos principais podem-se enumerar outras variáveis importantes na análise morfológica da vertente, como a altitude; a área real (largura x comprimento); a amplitude; e a densidade de sulcos ou ravinamentos.

Quando descrita por meio de seus perfis longitudinais e transversais a vertente consiste basicamente de arranjos espaciais dos perfis retilíneos, convexos e côncavos. Quanto aos perfis longitudinais, o perfil retilíneo apresenta ângulos de inclinação aproximadamente constantes; o perfil convexo apresenta curvatura positiva, com ângulos aumentando continuamente para baixo e, o perfil côncavo, curvatura negativa, com ângulos decrescentes para baixo.

As três possíveis formas - retilínea, convexa e côncava - ao longo do comprimento e largura da vertente, produzem em combinação novas geometrias básicas, com três grupos de complexidade. A Fig. 3.2 ilustra essa geometria, em que o comprimento da vertente é medido ao longo da direção de maior inclinação, de cima para baixo; e a largura da vertente é medida transversalmente; L significa linear ou retilínea, V, convexa, C, côncava. Analisando a figura como uma matriz, a forma mais simples (grupo I) é aquela de comprimento e largura

retilíneos (LL). As superfícies do grupo II têm comprimento retilíneo com largura curva (LV,LC) ou largura retilínea com comprimento curvo (VL, CL). E as superfícies mais complexas (grupo III) têm comprimento curvo e largura curva - VV, VC, CV e CC (Ruhe, 1975).

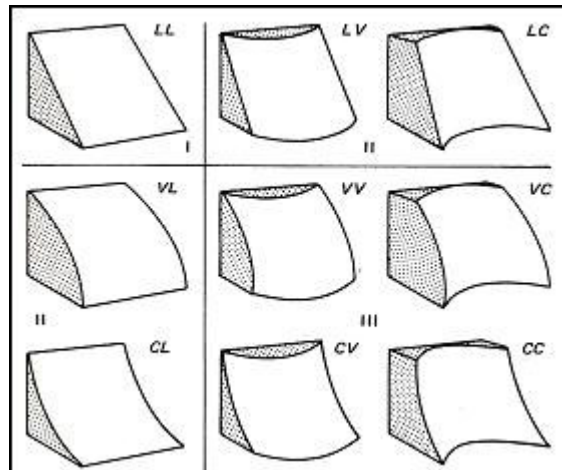


Figura 3.2. Formas geométricas das vertentes (modificado de Ruhe, 1975).

3.2. MODELAGEM DE INFORMAÇÕES ALTIMÉTRICAS

Para a descrição, análise do relevo e extração de índices geomorfométricos, partindo-se de dados altimétricos como curvas de nível, necessita-se de processamentos que incluam operações de geração de modelos digitais, representando a superfície. Dentre essas operações um dos métodos mais comuns consiste na interpolação entre os valores de altitude.

A interpolação pode ser entendida como um procedimento de previsão ou estimativa de valores não conhecidos em torno de pontos medidos, estimativas essas que consideram a correlação espacial interna de um conjunto de dados. A interpolação usa o princípio de que para a estimativa de valores desconhecidos, os valores conhecidos no local, no seu entorno ou vizinhança são de maior relevância que aqueles mais distantes e pesos podem ser atribuídos aos pontos de acordo com a sua distância do ponto de valor conhecido. O processo de previsão de valores de um atributo em locais situados fora da área abrangida pelas observações existentes é denominado extrapolação (Burrough & McDonnell, 1998, Meijerink et al., 1994).

As superfícies contínuas são geralmente representadas por linhas ou imagens, como é o caso das linhas de isovalores, associadas a pontos cotados; grades triangulares irregulares (TIN); grades regulares retangulares; mapas temáticos e imagens em níveis de cinza.

De igual modo, um modelo digital de elevação pode ser entendido como uma representação da superfície contínua. Consiste em uma variação ordenada de números que representam a distribuição espacial de elevações acima de um *datum* arbitrário na paisagem. A princípio, um modelo digital de elevação (MDE) descreve a elevação de qualquer ponto de uma dada área em um formato digital e pode conter informações sobre as denominadas linhas de quebra. Essas são linhas como a própria drenagem, as cristas e outras quebras positivas e negativas da vertente, como curvaturas acentuadas ou mudanças bruscas na inclinação (Meijerink et al., 1994). Para Horn (1981), um modelo numérico do terreno (MNT), por sua vez, inclui a distribuição espacial de atributos do terreno. É um mapa topográfico em formato digital, consistindo não somente de um MDE, mas também de outras informações temáticas. Consiste em uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície contínua real. Por exemplo, uma ortofoto digital ou imagem temática, sobreposta a um MDE, permitindo uma visão em perspectiva da paisagem, consiste em um modelo numérico de terreno - MNT.

3.3. GRADIENTE, ORIENTAÇÃO E CURVATURA DAS VERTENTES

A inclinação é um dos enfoques mais importantes na análise da superfície, pois as superfícies são compostas na sua totalidade por inclinações e os ângulos das inclinações controlam a força gravitacional disponível para a realização dos processos geodinâmicos (Evans, 1972).

A inclinação em um ponto é definida pelo ângulo formado entre um plano tangencial à superfície naquele ponto e a horizontal. Este plano é caracterizado por seu gradiente (máxima inclinação em relação à horizontal) e pela sua orientação (direção de uma linha perpendicular à máxima inclinação, medida em graus no sentido horário a partir do norte). A direção do plano de inclinação é denominada aspecto, exposição ou orientação. O plano tangente à superfície é a primeira derivada da altitude, ou seja, a variação da altitude em relação à distância (Evans, 1972). Assim, a inclinação compreende dois componentes, representando as primeiras derivadas da altitude da superfície: o gradiente e a orientação.

Para análise da inclinação do terreno, pode-se considerar uma superfície $z(x,y)$ vista de cima, de uma grande distância. O eixo x aponta para o leste, o eixo y para o norte e o eixo z é ortogonal aos outros dois eixos. A orientação de um elemento da superfície pode ser especificada simplesmente por sua inclinação p na direção do eixo x (eixo leste-oeste) e sua inclinação q na direção do eixo y (norte-sul). As inclinações p e q são os componentes do vetor gradiente (p, q) (Horn, 1981).

As inclinações p e q são estimadas a partir dos valores de elevação do terreno. Horn (1981) afirma ser conveniente utilizar, nessa estimativa, valores de elevação da vizinhança de um ponto particular. No contexto de um simples ponto como coordenada discreta (i, j) , Horn (1981) denotou a elevação naquele ponto por z_{00} , enquanto as elevações dos pontos adjacentes à grade, a oeste e a leste, foram chamadas z_{-0} e z_{+0} , respectivamente. Similarmente, elevações nos pontos ao sul e norte foram denotadas z_{0-} e z_{0+} (Fig. 3.3).

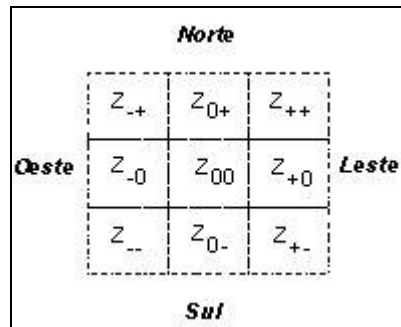


Figura 3.3. Grade 3x3 das elevações, a partir de Horn (1981).

A estimativa mais simples para a inclinação p , segundo Horn (1981), poderia ser:

$$p \text{ à direita} = (z_{+0} - z_{00})/\Delta x \quad (3.1)$$

$$p \text{ à esquerda} = (z_{00} - z_{-0})/\Delta x \quad (3.2)$$

Onde Δx é o intervalo da grade na direção leste-oeste, expresso na mesma unidade das elevações do terreno. Segundo Horn (1981), estas estimativas são tendenciosas ("biased"), ao se estimar a metade da inclinação em um intervalo da grade à direita e à esquerda do ponto central, respectivamente. Entretanto, a diferença central, não é tendenciosa ("unbiased") (Eq. 3.3).

$$p = (z_{+0} - z_{-0})/2\Delta x \quad (3.3)$$

A análise numérica, segundo Horn (1981), mostra que uma estimativa ainda melhor é obtida utilizando uma média ponderada das três diferenças centrais (Eq. 3.4):

$$p = [(z_{++} + 2z_{+0} + z_{+-}) - (z_{-+} + 2z_{-0} + z_{--})]/8\Delta x \quad (3.4)$$

Simetricamente, pode-se estimar a inclinação sul-norte (Eq. 3.5),

$$q = [(z_{++} + 2z_{0+} + z_{+-}) - (z_{+-} + 2z_{0-} + z_{--})]/8\Delta y \quad (3.5)$$

Para Horn (1981), essas expressões produzem melhores estimativas para os componentes do gradiente do ponto central. Os resultados dependem das elevações em uma vizinhança de 3x3, com valores de elevação individuais ponderados, e portanto dependem da vizinhança menos do que dependeriam em uma expressão mais simples, para a diferença central. A vantagem está em que erros locais na elevação do terreno tendem a não contribuir com tanto peso para o erro na inclinação. Ao mesmo tempo, mais cálculos são necessários.

Em se tratando de uma direção arbitrária, dados a inclinação p na direção leste-oeste e a inclinação q na direção norte-sul, nota-se que p e q são as primeiras derivadas parciais da elevação z , com respeito a x e y , respectivamente ($p = \partial z / \partial x$ e $q = \partial z / \partial y$). A direção no plano xy na qual a inclinação é máxima é (p, q) , e a inclinação máxima, $\tan \theta$, é dada por (Horn, 1981):

$$\tan \theta = (p^2 + q^2)^{1/2} \quad (3.6)$$

A orientação em um ponto pode ser definida como o ângulo existente entre o vetor que aponta para o Norte e a projeção sobre o plano horizontal do vetor normal à superfície nesse ponto (Felisícimo, 1994). O valor da orientação, ϕ , pode ser estimado a partir dos valores do gradiente, por meio da expressão da Eq.3.7 (Burrough & McDonnell, 1998):

$$\tan \phi = -\left(\frac{\partial z / \partial y}{\partial z / \partial x}\right) \quad (3.7)$$

A curvatura equivale à taxa de variação da inclinação da superfície tanto em relação à máxima inclinação, quanto em relação à direção dessa inclinação máxima, podendo assim ser considerada matematicamente como as segundas derivadas da superfície, a curvatura do perfil e a curvatura plana, respectivamente. É possível partir de uma equação quadrática representando a superfície, conforme a Eq. 3.8:

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3.8)$$

onde a relação entre os coeficientes e os nove valores de elevação para cada célula são apresentados nas expressões da Eq.3.9 à Eq.3.17. Segundo Zevenbergen & Thorne (1987), os coeficientes podem ser determinados a partir da submatriz 3x3, e os índices elementares podem ser encontrados diferenciando e resolvendo a equação quadrática em relação ao ponto central da submatriz 3x3 ($x = y = 0$):

$$A = \left[\frac{(Z_{-+} + Z_{++} + Z_{--} + Z_{+-})}{4} - \frac{(Z_{0+} + Z_{-0} + Z_{+0} + Z_{0-})}{2} + Z_{00} \right] / \Delta x^4 \quad (3.9)$$

$$B = \left[\frac{(Z_{-+} + Z_{++} - Z_{--} - Z_{+-})}{4} - \frac{(Z_{0+} - Z_{0-})}{2} \right] / \Delta x^3 \quad (3.10)$$

$$C = \left[\frac{(-Z_{-+} + Z_{++} - Z_{--} + Z_{+-})}{4} - \frac{(Z_{-0} - Z_{+0})}{2} \right] / \Delta x^3 \quad (3.11)$$

$$D = \left[\frac{(Z_{-0} + Z_{+0})}{2} - Z_{00} \right] / \Delta x^2 \quad (3.12)$$

$$E = \left[\frac{(Z_{0+} + Z_{0-})}{2} - Z_{00} \right] / \Delta x^2 \quad (3.13)$$

$$F = \frac{(-Z_{-+} + Z_{++} + Z_{--} - Z_{+-})}{4\Delta x^2} \quad (3.14)$$

$$G = \frac{(-Z_{-0} + Z_{+0})}{2\Delta x} \quad (3.15)$$

$$H = \frac{(Z_{0+} - Z_{0-})}{2\Delta x} \quad (3.16)$$

$$I = Z_{00} \quad (3.17)$$

Onde Δx (igual a Δy) é o espaçamento da malha regular, e os valores de Z (esquematisados na Fig. 3.4) correspondem às elevações do terreno em torno da célula central da matriz de convolução.

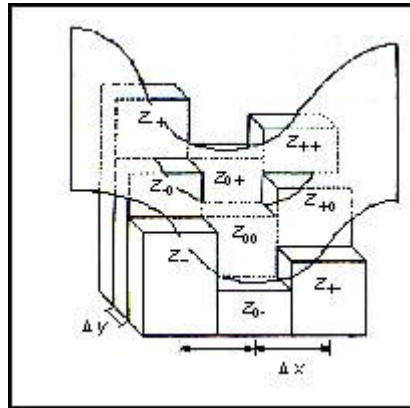


Figura 3.4. Diagrama dos valores de altitudes do polinômio ajustado à superfície do terreno, para o cálculo da curvatura (modificado de McCoy & Johnston, 2002).

As curvaturas da superfície, curvaturas do perfil (paralela ao gradiente) e curvaturas planas (transversa ao gradiente) são calculadas em cada célula central, por meio da matriz de convolução de dimensão 3x3, sobre a matriz de altitudes que representa o terreno. O cálculo das curvaturas pode ser feito a partir do cálculo da curvatura média geral, η , ou seja, a concavidade/convexidade geral da superfície no ponto central, a partir da sua vizinhança. Parte-se da soma das derivadas parciais de segunda ordem da equação que representa a

superfície (Eq. 3.8), em relação aos eixos x e y (Felicísimo, 1994), para o cálculo da curvatura média geral (Eq. 3.18):

$$\eta = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \quad (3.18)$$

As primeiras derivadas do polinômio apresentado na Eq. 3.8 são (Eq.3.19 e Eq.3.20):

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2Axy^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + Fy + G \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = 2Ax^2y + 2Bx^2 + 2Cxy + 2Ey + Fx + H \quad (3.20)$$

e as de segunda ordem (Eq. 3.21 e Eq. 3.22):

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 2Ay^2 + 2By + 2D \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2Ax^2 + 2Cx + 2E \quad (3.22)$$

Substituindo-se a Eq. 3.21 e a Eq. 3.22 na Eq.3.18, tem-se a Eq. 3.23 (observando-se a convenção de que as vertentes côncavas têm valores negativos), referente à curvatura média da superfície:

$$\eta = -2(Ax^2 + Ay^2 + By + Cx + D + E) \quad (3.23)$$

Como o cálculo é realizado relativo à célula central da matriz de convolução ($x=y=0$), tem-se (Eq. 3.24, Eq. 3.25 e Eq. 3.26):

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 2D \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2E \quad (3.25)$$

$$\eta = -2(D + E) \quad (3.26)$$

A curvatura média geral pode ser decomposta em dois componentes ortogonais relativos à curvatura do perfil η_{perfil} e à curvatura plana η_{plana} (Burrough & McDonnell, 1998), segundo as expressões (Eq. 3.27 e Eq. 3.28):

$$\eta_{perfil} = \left[\frac{-2(DG^2 + EH^2 + FGH)}{(G^2 + H^2)} \right] \quad (3.27)$$

$$\eta_{plana} = \left[\frac{2(DH^2 + EG^2 - FGH)}{(G^2 + H^2)} \right] \quad (3.28)$$

A definição da forma da superfície por agrupamento de índices elementares (gradiente, orientação, curvatura do perfil e plana) em unidades homogêneas, pode ser utilizada para descrever as características físicas de uma superfície na paisagem. Os padrões de linhas de fluxo de acordo com a curvatura da superfície são apresentados na Fig. 3.5.

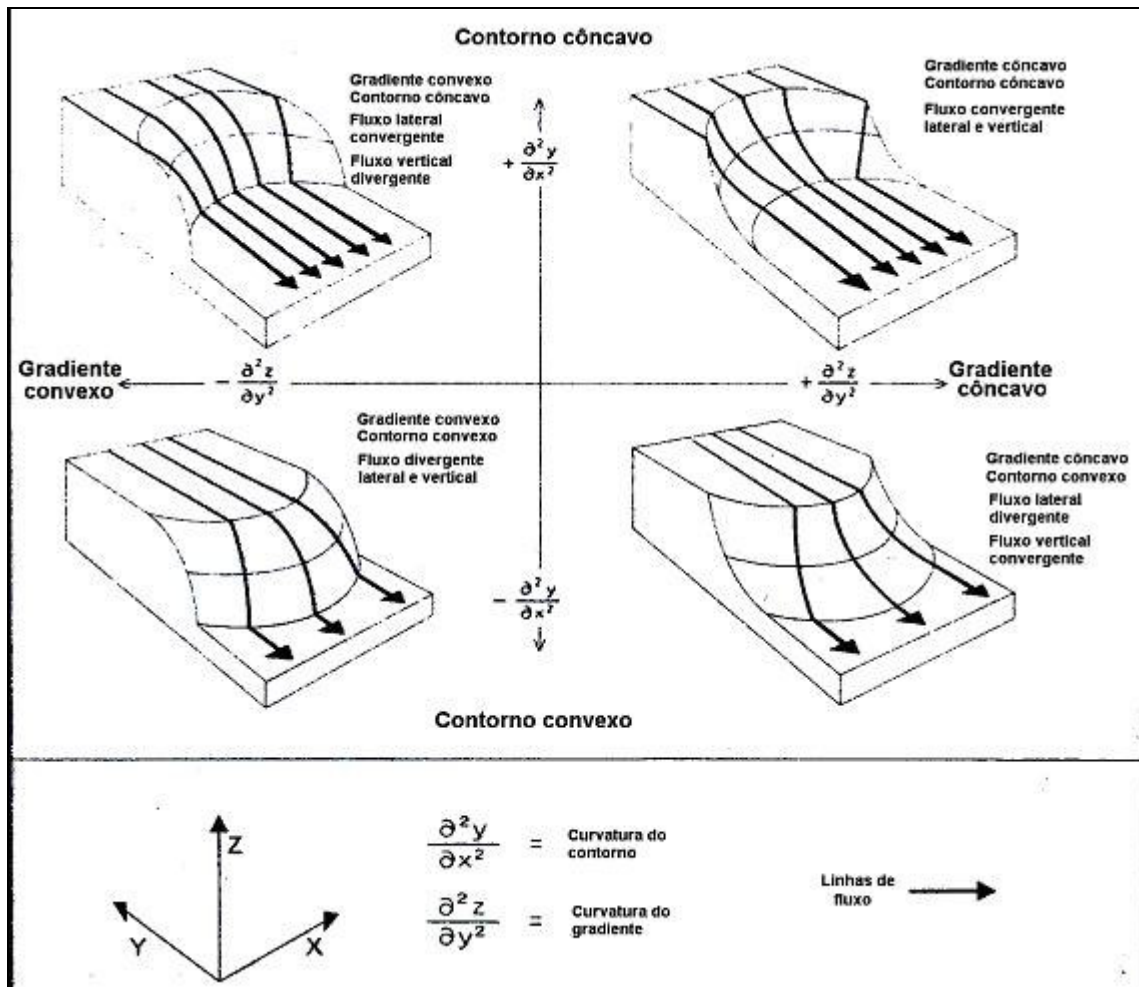


Figura 3.5. Padrões básicos de linhas de fluxo a partir de várias combinações da curvatura do gradiente ou do perfil, e curvatura do contorno ou plana (modificado de Huggett, 1975).

O efeito da topografia sobre os processos hidrológicos e sedimentares é reconhecido, afetando significativamente os processos de erosão e escoamento superficial. As condições de drenagem da vertente são as principais causas da variação das propriedades do solo. Uma vez que não são constatados eventos geomorfologicamente catastróficos recentes, considerando a vertente relativamente estável, o tipo de solo que ocorre em determinado ponto da paisagem

pode ser determinado pela influência dos atributos da forma do terreno sobre os processos de movimento e distribuição da água. A curvatura ao longo da inclinação máxima, ou seja, do perfil (também denominada de curvatura do gradiente) define a forma da superfície nessa direção, e afeta a aceleração e desaceleração do fluxo vertical, influenciando os processos de erosão e deposição, respectivamente. Já a curvatura plana influencia a convergência e divergência do fluxo lateral (Troeh, 1965, Zevenbergen & Thorne, 1987, Odeh et al., 1991, Moore, et al., 1993; McCoy & Johnston, 2002).

3.4. CLASSIFICAÇÃO E COMPARTIMENTAÇÃO DO RELEVO A PARTIR DE INFORMAÇÕES ALTIMÉTRICAS

Diversas formas de classificação do relevo a partir de suas variáveis morfométricas têm sido propostas. Segundo Franklin & Peddle (1987), a análise de textura de um modelo digital de elevação (MDE) foi sugerida por Evans (1972) quando propôs o sistema geral de geomorfometria. São cinco índices básicos nesse sistema: altitude, gradiente (primeira derivada da elevação), orientação (componente direcional do gradiente), convexidade ou concavidade (curvatura da superfície) e relevo (variabilidade da superfície). Para a classificação do relevo, medidas de variabilidade e homogeneidade espacial da distribuição de altitudes têm sido denominadas de análise de textura ou rugosidade, ou ainda de relevo do terreno (Felicísimo, 1994). O relevo do terreno (*terrain relief*) foi caracterizado por Evans (1972) utilizando o desvio padrão da elevação.

Assim, a compartimentação do relevo pode ser realizada a partir da extração de informações topográficas, como o gradiente, orientação e curvaturas do perfil e plana; ou ainda do agrupamento desses índices elementares, como o comprimento da trajetória de fluxo. E a distribuição espacial do índice elementar, altitude, também pode se constituir em base para a compartimentação do terreno, utilizando-se por exemplo a curva hipsométrica, na delimitação de níveis que caracterizem as distribuições altimétricas homogêneas, levando em conta as frequências de altitudes (Evans, 1980; Casseti, 1981; Novaes Pinto, 1985; Hermuche et al., 2003). A aplicação de métodos de classificação do relevo em unidades homogêneas consiste em uma importante ferramenta de delimitação geomorfológica e de unidades do solo no processo de mapeamento (Friedrich, 1998).

Franklin & Peddle (1987) apresentaram o procedimento para caracterizar a variabilidade espacial na elevação e interpretam medidas da variabilidade do relevo do terreno, em que a variabilidade ou aleatoriedade é medida pela entropia do relevo. A entropia para Franklin & Peddle (1987) é uma medida clássica do relevo na qual mede-se a

variabilidade absoluta na elevação ($z_{\text{máx}} - z_{\text{mín}}$) sobre a janela selecionada, sem referência à inclinação ou à orientação. Para se caracterizar texturas grosseiras utilizar-se-ia maiores tamanhos de janela e maiores distância entre os pares na análise. Desse modo, as medidas de textura podem ser interpretadas a partir da análise do relevo, sendo úteis na discriminação de feições ou classes na paisagem e tipos de terreno, gerando uma base para análises geomorfométricas.

O conceito de entropia associado ao relevo parte da analogia entre o sistema termodinâmico, a evolução das paisagens e a teoria de informação (Zdenkovic & Scheidegger, 1989; Connelly, 1972; Leopold & Langbein, 1962).

3.4.1. ENTROPIA DA PAISAGEM

A evolução de uma paisagem está condicionada por dois tipos de processos: os processos endógenos, originados no interior da Terra, os quais constroem a estrutura do relevo; e os processos exógenos, originados na atmosfera e hidrosfera, os quais extraem sua energia da radiação do sol, responsáveis pelo modelado do relevo. A paisagem, então, é um sistema em equilíbrio dinâmico.

Uma das definições de entropia da paisagem pode ser estabelecida por uma analogia entre a altitude do relevo em uma paisagem e a temperatura em um sistema isobárico. De acordo com os princípios da termodinâmica geral, os sistemas evoluem de modo que sua entropia aumenta.

A entropia da paisagem também pode ser estabelecida por uma analogia com os sistemas de informação e o cálculo da probabilidade da presença de altitudes de relevo, baseado na fórmula de probabilidade de Boltzmann (1895), citado por Zdenkovic & Scheidegger (1989), o que será descrito no próximo item.

3.4.1.1. DEFINIÇÃO FENOMENOLÓGICA DA ENTROPIA DA PAISAGEM

Ao longo do tempo, toda paisagem está em um certo estado de evolução. Na estrutura da teoria dos sistemas, cada estado determinado tem uma certa probabilidade de ocorrência. A função que expressa a dispersão de estados do sistema, quantitativamente, é a entropia (Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

Na descrição puramente fenomenológica da termodinâmica (Planck, 1945, citado por Zdenkovic & Scheidegger, 1989), a entropia é uma das funções, em que, denotando temperatura por T , a energia termal por Q , tem-se para a entropia S em um sistema isobárico, a seguinte equação (Eq. 3.29):

$$dS = dQ / T \quad (3.29)$$

Visto que, como a energia necessária para o transporte de uma determinada quantidade de massa M de um elemento da paisagem é determinada por sua altitude h , essa altitude pode ser considerada análoga à temperatura na termodinâmica, características de um sistema termodinâmico aberto. Assim, por analogia, tem-se a Eq. 3.30 (Zdenkovic & Scheidegger, 1989):

$$dS = dM / h \quad (3.30)$$

3.4.1.2. DEFINIÇÃO ESTATÍSTICA DA ENTROPIA DA PAISAGEM

Na termodinâmica existe, além da abordagem fenomenológica, a abordagem estatística. A analogia à teoria da termodinâmica estatística pode de igual modo ser aplicada à teoria da evolução da paisagem. O conceito de entropia foi definido estatisticamente por Boltzmann (1895), citado por Joos (1958), com a finalidade de descrever o estado de um gás ideal cujas moléculas foram localizadas com probabilidade w_i , em uma célula i de um espaço fase fechado.

De acordo com o princípio de Boltzmann (1895), citado por Joos (1958), a relação entre a entropia S de um sistema em um determinado estado, e a probabilidade w de encontrar o sistema naquele estado é

$$S = k \ln w \quad (3.31)$$

onde k é uma constante.

Um sistema passará por mudanças de estado até a entropia alcançar um valor máximo. A entropia S de um macro-sistema, que consiste de micro-sistemas, é igual à soma das entropias desses micro-sistemas (Zdenkovic & Scheidegger, 1989):

$$S = S_1 + S_2 + \dots = k \sum_{i=1}^n \log w_i \quad (3.32)$$

onde w_i denota as probabilidades dos estados dos micro-sistemas independentes.

A entropia de uma distribuição de elementos, dado pelo conjunto (x_i) em um grande sistema, é dada por (Eq. 3.33):

$$S = k \log w \cong \text{constante} - k \sum_i x_i \ln x_i \quad (3.33)$$

3.4.1.3. ENTROPIA NA TEORIA DA INFORMAÇÃO

A definição estatística de entropia foi aplicada à teoria da informação por Shannon & Weaver (1962), os quais afirmam que toda fonte de informação possui uma entropia que

depende da frequência de aparecimento dos elementos. No caso de uma fonte discreta, com n elementos discretos, i ($i=1,2,\dots,n$), aparecendo em frequências f_i , a entropia é definida em analogia com a fórmula para um sistema fechado, como a seguir (Shannon & Weaver, 1962; Zdenkovic & Scheidegger, 1989):

$$S = -\sum_{i=1} f_i \text{ld} f_i \quad (\text{bit}) \quad (3.34)$$

onde ld denota o logaritmo na base 2, o qual é conveniente para aplicações computacionais (a unidade é portanto “um bit”).

Para o caso de uma fonte contínua, tem-se correspondentemente,

$$f_i \{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (3.35)$$

e

$$S = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \text{ld} f(x) dx \quad (\text{bit}) \quad (3.36)$$

As expressões acima correspondem à definição de Boltzmann (1895) de entropia (Eq. 3.31) aplicada a um sistema fechado (Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

Na prática, a verdadeira função de frequência contínua $f(x)$ não pode ser encontrada exatamente, mas deve ser aproximada por um procedimento de intervalo de discretização, tendo-se as seguintes relações (Pavlic, 1970, citado por Zdenkovic & Scheidegger, 1989):

$$S = S_{apr} + \text{ld} \Delta x \quad (3.37)$$

$$S_{apr} = -\sum_{i=1}^n f(x)_i \Delta x \text{ld} [f(x)_i \Delta x] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \text{ld} f(x) dx - \text{ld} \Delta x \quad (\text{bit}) \quad (3.38)$$

onde S_{apr} representa o valor aproximado de entropia e $f(x)_i \Delta x$, o papel de f_i no caso discreto (Fig. 3.6).

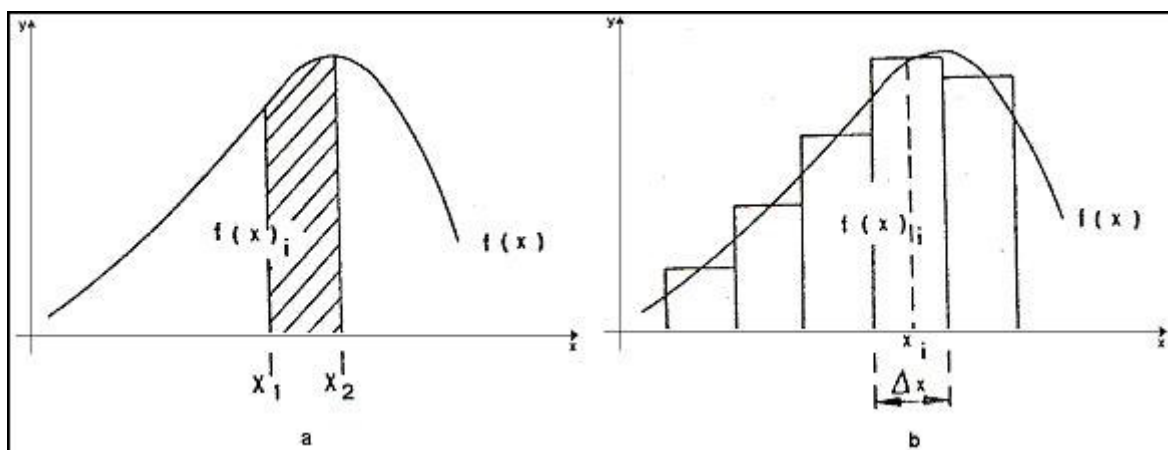


Figura 3.6. (a) Função freqüência $f(x)$ para uma variável contínua; (b) discretização de uma variável contínua (modificado de Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

A entropia assim definida é uma quantidade positiva; é igual a zero se um elemento acontece como certeza; e é máxima se todo elemento tem a mesma probabilidade de acontecer.

Deste modo, a entropia na teoria da informação corresponde à incerteza probabilística associada a uma distribuição de probabilidade, em que, quanto mais "espalhada" a distribuição de probabilidade, maior é a incerteza (Fig. 3.7). Segundo Mattos & Veiga (2002), a medida para quantificação da entropia introduzida por Shannon & Weaver (1962) pode ser utilizada para medidas de similaridade ou diversidade.

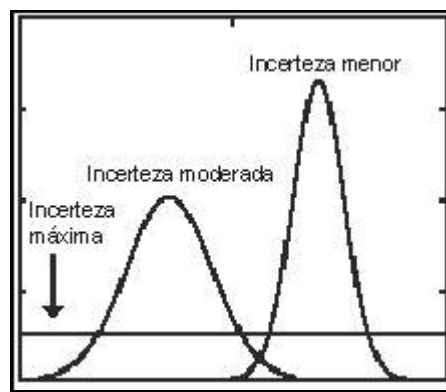


Figura 3.7. Representação gráfica de distribuições contínuas de probabilidade em relação a maiores e menores incertezas (modificado de Mattos & Veiga, 2002).

3.4.1.4. ANALOGIA À PAISAGEM

As definições estatísticas de entropia apresentadas podem ser aplicadas à análise de paisagens. Tratando paisagens como sistemas abertos, uma paisagem pode ser considerada como um sistema estatístico de pontos de altitudes h cuja probabilidade de ocorrência é w (Zdenkovic & Scheidegger, 1989). Assim, h é uma função de probabilidade,

$$h = f(w) \tag{3.39}$$

Portanto, a entropia da paisagem, S , é também uma função da probabilidade de acordo com a fórmula de Boltzmann (1895), citado por Zdenkovic & Scheidegger (1989), apresentada na Eq. 3.31. Orlov & Filippov (1970), citados por Zdenkovic & Scheidegger (1989), fazem uma revisão das fórmulas de entropia para sistemas abertos contínuos. Segundo Zdenkovic & Scheidegger (1989), é mais comum, entretanto, na teoria estatística, considerar paisagem como um sistema fechado. Logo, o procedimento para a definição de entropia pode

ser realizado a partir da teoria da informação, considerando um momento instantâneo, como um corte no tempo.

A medida de diversidade aplicada à geomorfologia, originada da teoria da informação e proposta por Connely (1972) pode ser escrita como a expressão da Eq. 3. 40:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (3.40)$$

onde p_i é a probabilidade do valor i de altitude ocorrer na matriz do MDE, ou seja (Eq. 3.41),

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3.41)$$

onde N é o número do total de células do MDE e n_i é o número desse total que tem valor pertencente à classe i . O mínimo valor de H ocorre quando todas as células do MDE têm o mesmo valor, ou seja, $H=0$ (Felicísimo, 1994).

Na prática, a entropia de uma paisagem pode ser determinada de uma seção do mapa, sendo aproximada pela expressão da Eq. 3.42 (Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

$$S_{apr} = -\sum_{i=1}^n f_{i,rel} \ln f_{i,rel} \quad (\text{bit}) \quad (3.42)$$

com

$$\sum_i^n f_{i,rel} = 1 \quad (3.43)$$

O valor da frequência relativa de determinada altitude ($f_{i,rel}$) pode ser normalizada a partir de um número padrão de curvas de nível. No caso de um número determinado de curvas para um tamanho definido de uma área de análise, Zdenkovic & Scheidegger (1989) propõem um valor normalizado de entropia (denominado S_n) o qual é função de S_{apr} ; da diferença de altura total na paisagem considerada e da equidistância entre as curvas de nível. Zdenkovic & Scheidegger (1989) citam exemplos de Lechthaler (1986), em que três tipos de paisagem da Iugoslávia foram analisados: um de áreas planas, um de uma região de colinas de média altitude (*medium-height mature type hill region*) e uma de altas montanhas (Fig.3.8). As seções dos mapas foram consideradas como fontes de informações contínuas; foram discretizadas (de acordo com a distância entre as curvas de nível); as frequências dos vários intervalos de altitude foram anotadas; e foram representadas em forma de histogramas.

As respectivas entropias foram calculadas de acordo com a Eq. 3.42. As frequências referem-se à variação de altura total encontrada em cada mapa respectivo. O procedimento foi executado para um total de 33 seções, relativas a áreas planas, colinas e altas montanhas. As entropias normalizadas obtidas são mostradas na Tab.3.1, de onde é possível a constatação de

que a entropia da paisagem estatisticamente calculada tem um valor maior para áreas planas do que para colinas ou altas montanhas (Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

Tabela 3.1. Entropia da paisagem normalizada para áreas planas, colinas e altas montanhas:

Forma da paisagem	Entropia normalizada
Planas	16,0 – 11,5
Colinas	11,5 – 9,0
Montanhas	9,0 – 7,0

Modificado de Zdenkovic & Scheidegger (1989).

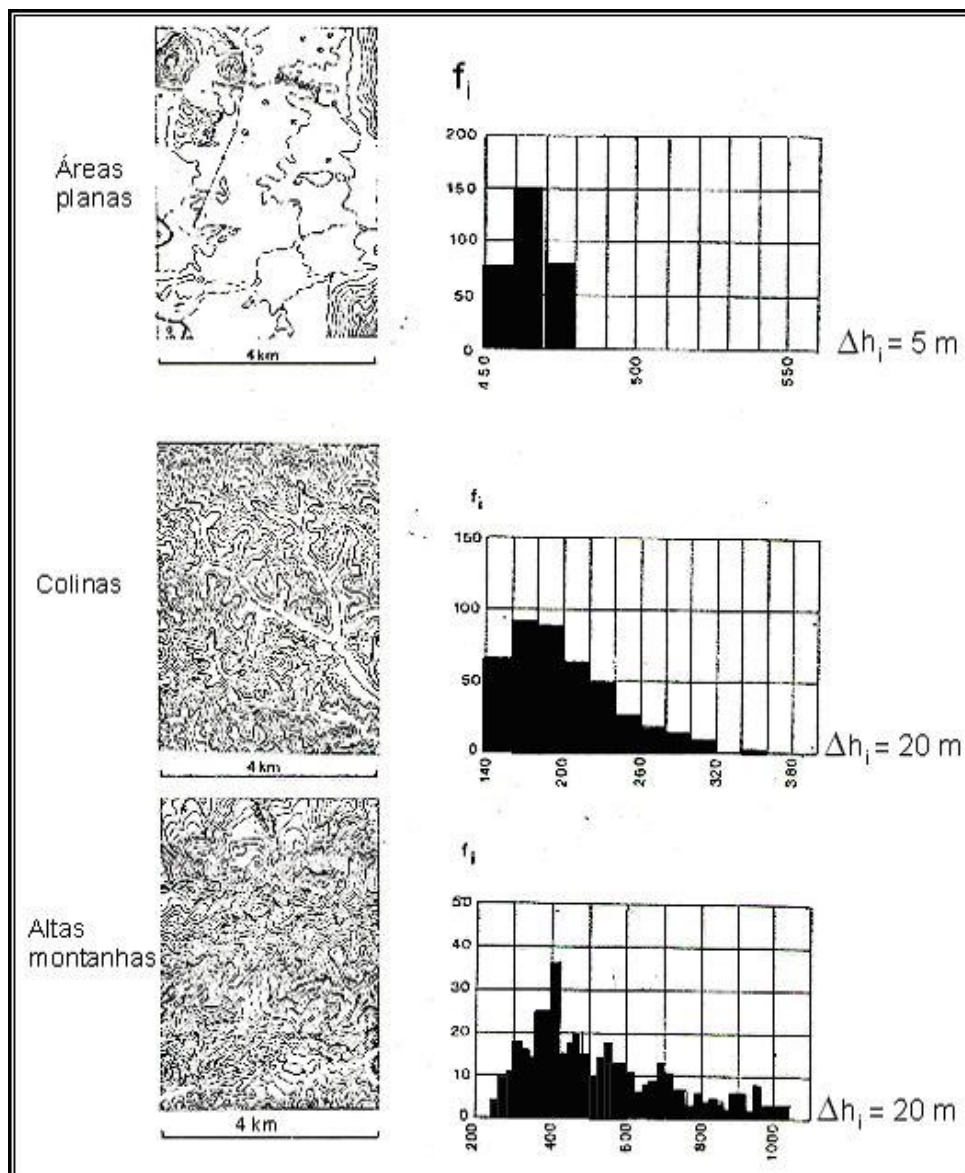


Figura 3.8. Frequências de altitudes empíricas para vários tipos de paisagens (da Iugoslávia). As seções dos mapas representam todas 24 km² (modificado de Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

Um relevo plano dissecado (*smooth plain*), por conseguinte, é o resultado final da evolução da paisagem. Na analogia termodinâmica correspondente ao sistema aberto, esse plano é base do nível de erosão: montanhas são intemperizadas; o material advindo dessas áreas é perdido. Na analogia estatística, correspondente ao sistema fechado, o plano final pode ser formado em qualquer elevação: o material de posições mais altas é transferido para locais mais baixos, o relevo se desenvolverá para uma altura média (e não para o nível de base de erosão); ou seja, os vales serão preenchidos com o material erodido das partes mais altas.

O estado inicial se desenvolverá em direção ao aumento da entropia. E, quanto mais plana a superfície, maior a sua entropia. Assim, em um sistema fechado, uma paisagem se desenvolverá do alto para o baixo relevo, como em um sistema aberto, mas com a seguinte diferença: nenhum material se perde pelo fato do sistema ser fechado (Zdenkovic & Scheidegger, 1989).

4. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA

O município de Goiânia é marcado pelo intenso incremento populacional, principalmente desde a década de 70, causando uma concentração dos espaços urbanos, refletida na verticalização da região central e sul da cidade. Pertencente à microrregião homônima e fazendo parte da mesorregião Centro Goiano, Goiânia é o município que, neste contexto, gera um processo de conurbação, como é o caso da parte sul, limítrofe ao município de Aparecida de Goiânia (Fig.4.1). Goiânia assume a liderança econômica do Aglomerado Urbano de Goiânia, composto por 14 municípios, dos quais fazem limites territoriais com a capital, os municípios de Goianira, Nerópolis e Goianópolis, ao norte; Aragoiânia e Aparecida de Goiânia, ao sul; Senador Canedo a leste; e Trindade a oeste (IBGE, 1999, IPLAN, 1992). Sua extensão territorial abrange 739,492 km² (dado referente ao ano de 2002), incluindo a área urbana, de expansão urbana e rural (IBGE, 2003). Seu plano original previa uma população de 50.000 habitantes, em que a área destinada à construção representava aproximadamente 65% (incluindo os espaços livres) e o restante destinava-se às vias públicas, parques e jardins, tendo se desenvolvido até 1950 segundo estas previsões (IPLAN, 1992). Segundo o Censo Demográfico do IBGE, Goiânia possuía em 2000 uma população de 1.093.007 habitantes (IBGE, 2003).

O crescimento acelerado e desordenado do município gerou inúmeros problemas, dentre os quais destaca-se o processo erosivo desencadeado em diversos pontos, entre outros relacionados à ocupação de fundos de vale e poluição dos mananciais hídricos. A Carta de Risco do município de Goiânia, elaborada em 1991, aponta a existência destes problemas (Nascimento & Podestá Filho, 1993).

A geologia da área é composta por rochas metamórficas proterozóicas e depósitos quaternários. A Fig. 4.2 apresenta o mapa geológico modificado de Campos et al.(2003), escala original de 1:50.000, abrangendo a quase totalidade do município. São principalmente granulitos ortoderivados e granulitos paraderivados subordinadamente, do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu, no trecho setentrional; e xistos, gnaisses e quartzitos do Grupo Araxá Sul de Goiás, no restante da área. Apresenta ainda coberturas aluvionares sotopondo indistintamente as unidades anteriores (Campos et al., 2003; Moreton, 1994).

O município encontra-se compartimentado, conforme sua geomorfologia, em cinco unidades morfológicas (Fig.4.3), o Planalto Dissecado de Goiânia a nordeste, os Chapadões de Goiânia na região sudoeste, o Planalto Embutido de Goiânia na faixa central (de SE para NW), Terraços e Planícies da Bacia do Rio Meia Ponte e Fundos de Vale.

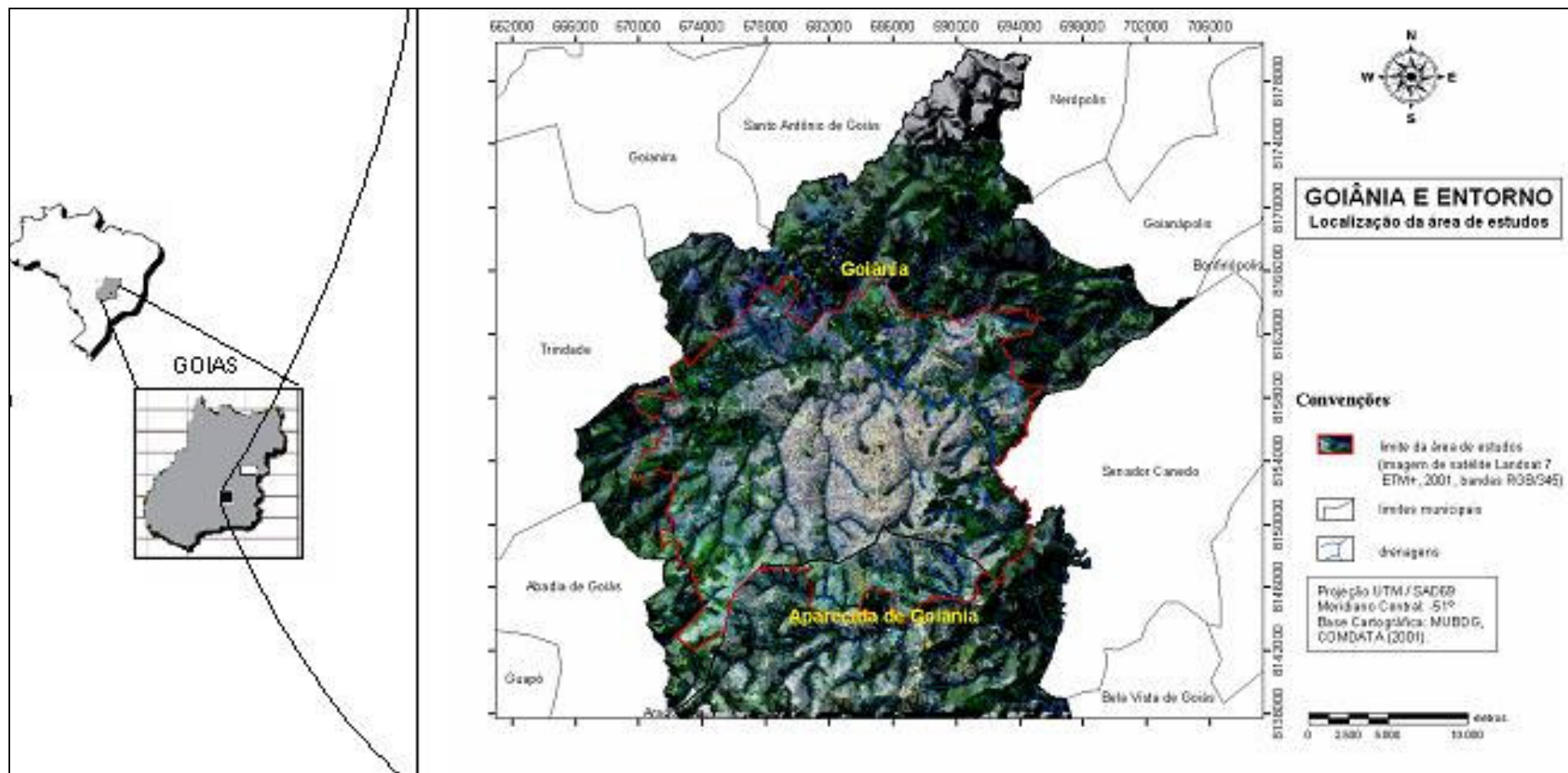


Figura 4.1. Localização do município de Goiânia, abrangendo a área de estudos, que compreende aproximadamente a área urbana, de expansão urbana e a área conurbada ao sul do município.

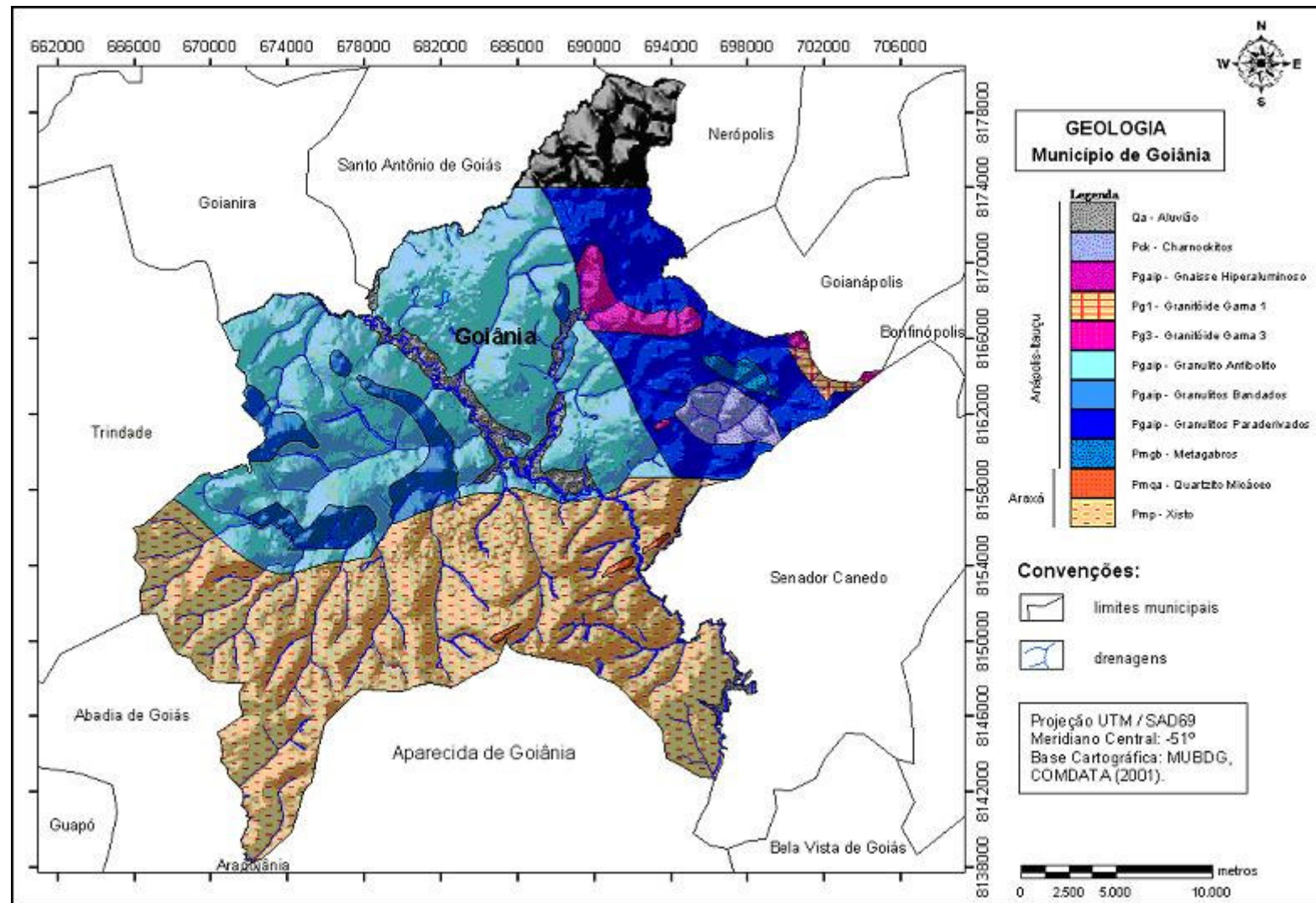


Figura 4.2. Mapa geológico abrangendo a quase totalidade do município de Goiânia (modificado de Campos et al., 2003; escala do original 1:50.000).

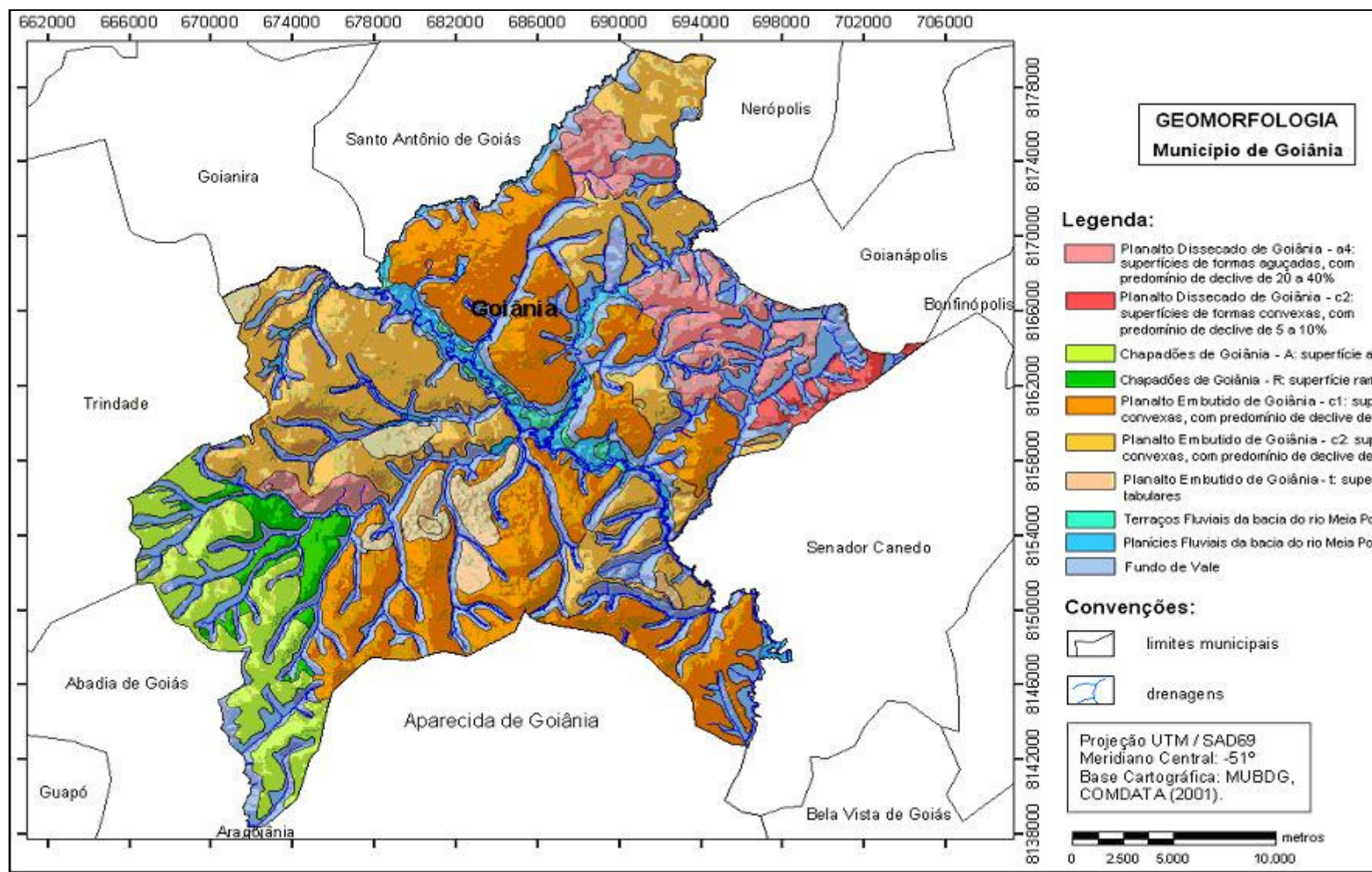


Figura 4.3. Mapa Geomorfológico do município de Goiânia, modificado de Casseti (1992). Escala da base cartográfica do original, 1:100.000.

Segundo Casseti (1992), as unidades geomorfológicas ocorrem nos seguintes domínios altimétricos: Planalto Dissecado de Goiânia com as maiores altitudes, de 920-950 m, Chapadões de Goiânia, de 860-900 m, Planalto Embutido de Goiânia, de 750-800 m, e unidades de Terraços e Planícies, de 700-720m. A distribuição altimétrica do município é apresentada na Fig 4.4.

Associados a essas unidades morfológicas estão os materiais de cobertura eluviais, coluviais e aluviais. Os primeiros, denominados depósitos detrito-lateríticos, são materiais de cores avermelhadas, formados por massa areno-argilosa contendo grãos e fragmentos de laterita e quartzo e associam-se a relevo de forma tabular. Os coluviões ocorrem indistintamente no município, constituindo-se de depósitos avermelhados, contendo fragmentos e grãos de material laterítico concrecionado e de quartzo. Existem, restritos a planícies fluviais, os colúvio-aluviões e, nos domínios dos fundos de vale, cascalhos, areias e siltes coluviais. Ainda ocorrem, associados às planícies de inundação dos principais cursos d'água, aluviões compostas por cascalhos, areias, siltes e argilas atuais e subatuais (IBGE,1999).

Os materiais de cobertura são representados por solos predominantemente do tipo Latossolo, em geral ocorrendo em relevo plano a suave ondulado (Fig. 4.5, Fig. 4.6). As principais classes encontradas e de maior expressão consistem em: Latossolo Vermelho Escuro (LE), correspondente a aproximadamente 25,5 % da área; Latossolo Roxo (LR), originado das rochas ultrabásicas, totalizando 25,5 % da área e Latossolo Vermelho Amarelo (LV), correspondente a 41 % da área. Ocorrem ainda, em menor proporção, solos do tipo Podzólico Vermelho Escuro (PE), com pedregosidade, concreções e cascalhos; Cambissolos (C), com presença de cascalhos, calhaus, ou mesmo matacões; Solos Litólicos (R), com presença em alguns casos de grande quantidade de cascalhos ou concreções ou mesmo de matacões no perfil ou na superfície; Gleissolos (G); e Solos Aluviais, distribuindo-se esses três últimos em planícies fluviais (IBGE, 1999).

A Fig. 4.7 representa a ocorrência dos solos no município de Goiânia classificados com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa/CNPS, 1999). Na metodologia utilizada por Campos et al. (2003), para a caracterização das classes de solos foram usados somente os parâmetros macroscópicos, como cor, estrutura, textura, presença de cerosidade e linhas de pedras, observados em perfis de solo, não tendo sido realizado o levantamento dos componentes químicos. Assim, os solos foram classificados apenas nos dois primeiros níveis categóricos do sistema de classificação da Embrapa/CNPS (1999). O levantamento realizado apontou a existência de três grupos definidos em função da dinâmica

das águas nos solos e a partir de análises de resultados de ensaios de infiltração *in situ*: o primeiro grupo abrangendo os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Nitossolo Vermelho e Chernossolo; o segundo o Cambissolo, Neossolo Litólico e Plintossolo e o terceiro, o Neossolo Flúvico e o Gleissolo.

Referente ao primeiro grupo, os latossolos observados segundo Campos et al. (2003) são solos que apresentam o horizonte B latossólico, em avançado estágio de intemperismo; compostos em geral por quantidades variáveis de óxidos de ferro e alumínio, argilas com estrutura mineral 1:1, quartzo e outros minerais resistentes ao intemperismo; com baixa capacidade de troca catiônica e expressiva atuação do processo de ferralitização; com espessura total em alguns casos maior que 20 metros e na maior parte dos casos bem drenados. São solos extremamente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou álicos. Campos et al. (2003) também aponta a presença de latossolos vermelhos distroféricos derivados dos granulitos de composição básica e ultrabásica.

Os nitossolos compreendem solos espessos e bem drenados com incremento no teor de argila no horizonte B; estruturação moderada a forte e superfície dos agregados com cerosidade; em geral moderadamente ácidos a álicos, com saturação por bases variando de baixa a alta; caulínicos-oxídicos e por isso com argilas de baixa atividade. A classe relativa ao chernossolo háplico engloba os solos com horizonte A chernozêmico, ou seja, horizonte relativamente espesso, com alta saturação por bases e cor escura; em geral moderadamente ácidos e fortemente alcalinos, com argila de atividade alta. Esses últimos são relacionados à ocorrência sobre as rochas calcissilicáticas do Complexo Anápolis-Itaúçu.

De acordo com Campos et al. (2003), o segundo grupo caracteriza-se por apresentar solos com perfis rasos a muito rasos, que favorecem o escoamento superficial e em muitos casos sem ocorrência de zona saturada. Já o terceiro grupo apresenta níveis d'água rasos, em que os solos permanecem totalmente saturados em alguns períodos do ano.

Quanto às condições hidrogeológicas, o manto de alteração compõe o domínio poroso caracterizado por uma porosidade intergranular. Além do domínio poroso, as rochas cristalinas do tipo granulitos, xistos e quartzitos constituem-se em aquíferos, as quais apresentam uma porosidade secundária de origem tectônica e, assim, só permitem acumulação de água em descontinuidades planares, como as zonas de fratura e as zonas de falhas (Campos et al., 2003).

O clima tropical úmido de Goiânia é comandado pelos sistemas regionais de circulação atmosférica, que atuam sobre a região Centro-Oeste.

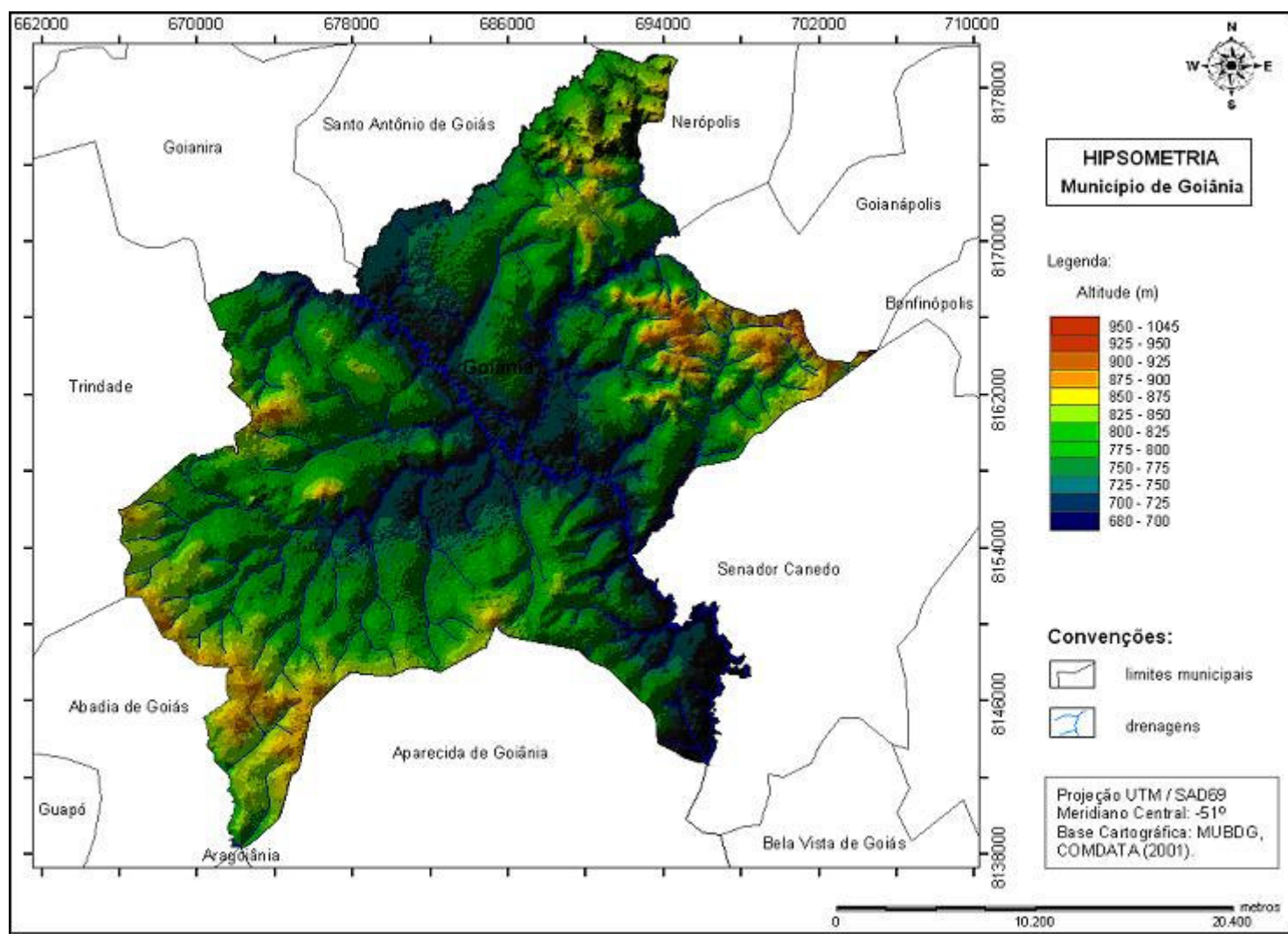


Figura 4.4. Carta hipsométrica do município de Goiânia (imagem resultante da "Shuttle Radar Topography Mission", da "U. S. Geological Survey, EROS Data Center", de maio de 2003, resolução de 90 m).

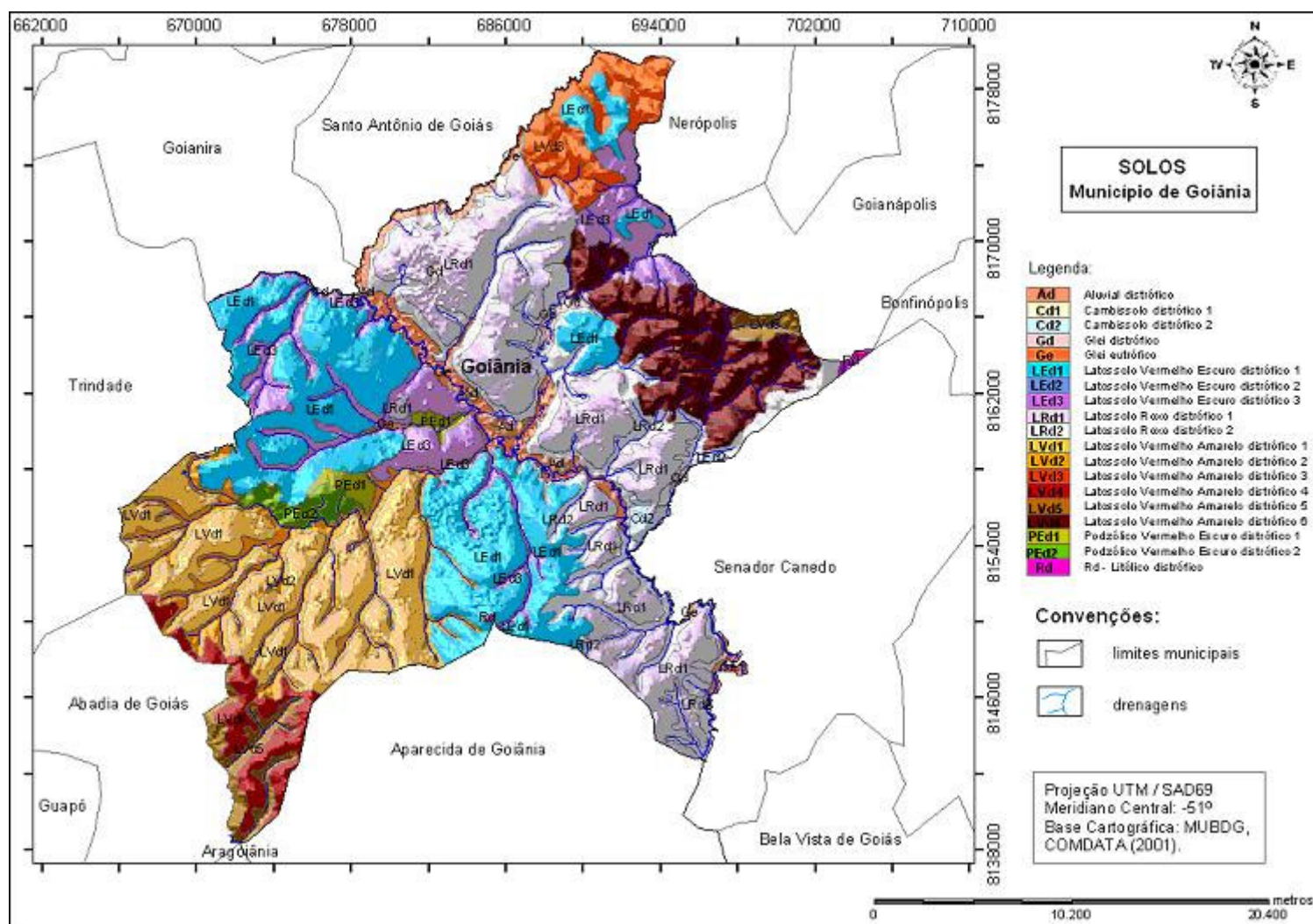


Figura 4.5. Mapa de solos do município de Goiânia (modificado de IPLAN / IBGE / UFG, 1991, escala do original, 1:40.000), a legenda encontra-se expandida na Fig. 4.6.

LE d1	Latossolo Vermelho Escuro distrófico 1: A moderado, textura argilosa a muito argilosa, relevo plano.
LE d2	Latossolo Vermelho Escuro distrófico 2: A moderado, textura argilosa, relevo plano.
LE d3	Latossolo Vermelho Escuro distrófico 3: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado.
LR d1	Latossolo Roxo distrófico 1: A moderado, textura argilosa, relevo plano.
LR d2	Latossolo Roxo distrófico 2: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado.
LV d1	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico 1: A moderado, textura argilosa, relevo plano.
LV d2	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico 2: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado.
LV d3	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico 3: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado a ondulado.
LV d4	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico 4 - petroplíntico: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado a ondulado + Petroplíntico distrófico Tb - A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado.
LV d5	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico 5: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado + Podzólico Vermelho Escuro eutrófico Tb - A chernozêmico, textura média/argilosa, relevo ondulado a forte ondulado + Cambissolo eutrófico Tb - cascalhento, A moderado, textura argilosa, relevo forte ondulado.
LV d6	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico 6: A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado a ondulado + Cambissolo distrófico Tb - A moderado, textura média, muito cascalhento, relevo forte ondulado + Solos Litólicos distrófico Tb - A moderado, textura média, muito cascalhento, relevo forte ondulado.
PE d1	Podzólico Vermelho Escuro distrófico 1 Tb: A moderado, textura média/argilosa, relevo suave ondulado a ondulado + Cambissolo distrófico Tb - cascalhento, A moderado, textura argilosa, relevo ondulado a forte ondulado.
PE d2	Podzólico Vermelho Escuro distrófico 2 Tb: A moderado, textura argilosa, relevo ondulado a forte ondulado + Cambissolo eutrófico Tb - cascalhento, A moderado, textura argilosa, relevo forte ondulado.
Cd1	Cambissolo distrófico 1 Tb: A moderado, textura média, muito cascalhento, relevo ondulado a forte ondulado.
Cd2	Cambissolo distrófico 2 Tb: A moderado, textura média, muito cascalhento, relevo ondulado a forte ondulado + Solos Litólicos distrófico Tb, A moderado, textura média, muito cascalhento, relevo ondulado a forte ondulado + Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, A moderado, textura argilosa, relevo ondulado.
Gd	Gleissolo distrófico Tb: A moderado, textura argilosa, relevo plano + Solos Aluviais distrófico Tb - A moderado, textura média, relevo plano.
Ge	Gleissolo eutrófico Ta: A chernozêmico, textura argilosa, relevo plano + Solos Aluviais distrófico Tb - A moderado, textura média, relevo plano.
Ad	Aluviais distrófico e eutrófico Tb: A moderado, textura média, relevo plano.
Rd	Solos Litólicos distrófico: A moderado, textura média, muito cascalhento, relevo ondulado a forte ondulado.

Notas:

1. Nas associações figuram em primeiro lugar os solos que ocupam maior extensão ou, no caso de equivalência, o componente mais importante para utilização agrícola. Em função do componente principal, foram convencionados os símbolos e cores das unidades de mapeamento.
2. Os símbolos Ta e Tb significam, respectivamente, argila de atividade alta e argila de atividade baixa.
3. O mapeamento existente em áreas urbanas teve por finalidade seu registro histórico.

Figura 4.6. Legenda expandida do mapa de solos do município de Goiânia (modificado de IPLAN / IBGE / UFG, 1991).

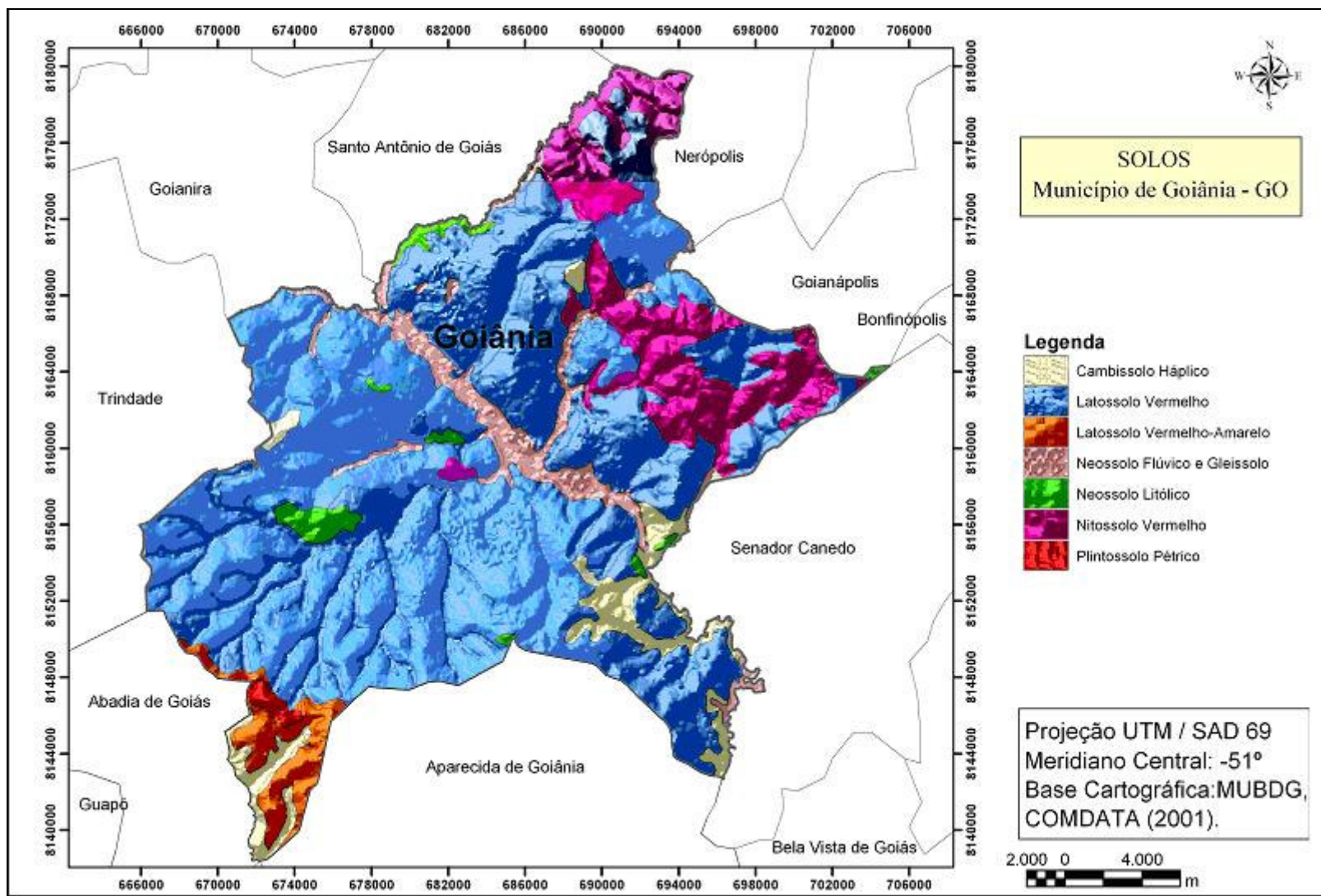


Figura 4.7. Mapa de solos do município de Goiânia segundo a classificação da Embrapa/CNPS (1999), modificado de Campos et al. (2003), escala do original, 1:50.000.

A dinâmica da circulação regional é responsável pela variação sazonal do clima de Goiânia, com duas estações bem definidas, uma úmida com chuvas torrenciais, e outra seca, de abril a setembro. No que se refere ao período de maior intensidade pluviométrica, os meses mais chuvosos são de dezembro a março, com precipitação média mensal acima de 250 mm e média anual de cerca de 1500 mm. Já a precipitação média dos meses menos chuvosos (junho a agosto) fica abaixo de 10 mm. As temperaturas mais elevadas durante o ano em Goiânia ocorrem nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, com médias oscilando entre 29°C e 31°C, muitas vezes chegando a índices superiores a 35°C. Os meses mais frios correspondem aos meses junho e julho, com médias das mínimas oscilando entre 13°C e 18°C. A esse mesmo período associam-se os menores índices de umidade relativa do ar, o qual apresenta uma variação térmica diária de até 10°C (IBGE 1999, SEPLAN 2002, Campos et al. 2003).

Por se encontrar em área de clima tropical úmido, com período seco muito prolongado, a cobertura vegetal no município de Goiânia caracteriza-se por formações florestadas, conhecidas como cerrado (Savana Arbórea Densa) e formações mais abertas (Savana Arbórea Aberta), o cerrado e o campo cerrado, que ocorrem em colinas suaves em solos pobres e lixiviados. Em relevo colinoso e em áreas aluviais ao longo dos rios, ocorrem também remanescentes de Floresta Estacional Semidecidual Aluvial ao longo do rio Meia Ponte, conhecida como floresta ciliar; de Floresta de Galeria, ao longo dos córregos; e de Floresta Estacional Semidecidual, como os agrupamentos florestais existentes no Campus II da UFG. Existem também em relevo colinoso as áreas de transição fitogeográfica, encontrados em forma de capões de contatos entre a Floresta Estacional e o Cerrado. Na parte noroeste do município, na região onde predominam rochas granulíticas ortoderivadas são ainda encontrados capões de Floresta Estacional Decidual (IBGE, 1999).

A rede de drenagens, entalhada nos relevos tabulares e suavemente convexos, compreende principalmente um segmento do rio Meia Ponte, afluente do rio Paranaíba, que nasce a aproximadamente 80 km a noroeste do município, cujas cabeceiras coincidem com os limites políticos, conferindo um aspecto embaciado à região. Seus tributários são pela margem esquerda, os córregos do Esgoto, Samambaia, Ladeira, Erosão, Lajeado e ribeirão João Leite; e pela margem direita os córregos São Domingos, da Onça, Palmito, Água Branca, Gameleira, Barreiro, São José e os ribeirões Caveirinha e Anicuns. O sudoeste de Goiânia é atravessado pela bacia do rio Dourados, a única que não se liga ao rio Meia Ponte no município (IBGE, 1999).

5. MODELAGEM DIGITAL E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DO TERRENO - GOIÂNIA

A compilação das informações existentes sobre a área de estudo, relacionadas ao meio físico do município de Goiânia, consistiu na fase inicial da pesquisa. Foi adquirida junto à Prefeitura de Goiânia uma base cartográfica digital, o Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia - MUBDG - versão 13 (COMDATA, 2001), que consta de dados planimétricos como arruamentos, divisas de quadras, bairros e municípios, logradouros e pontos notáveis; e de dados altimétricos.

Os dados altimétricos utilizados, correspondem às curvas de nível do MUBDG-V.13, digitalizadas pela COMDATA (2001), a partir de plantas e cartas topográficas existentes na escala de 1:2.000 de 1975, e de 1:20.000, de 1988 (Fig. 5.1). A equidistância entre as curvas de nível foi compatibilizada pela COMDATA (2001) em 5 m, para todas as curvas do respectivo mapa digital. Na presente pesquisa não foram utilizados os dados referentes aos pontos cotados existentes no MUBDG-V.13 porque os pontos que constavam no arquivo digital não correspondiam aos pontos cotados existentes nas respectivas cartas topográficas, em formato analógico, contendo outros pontos localizados ao longo do meio fio, quase todos com valores nulos.

As curvas de nível, importadas a partir de dois arquivos no formato *DXF*, foram corrigidas com base em cartas planialtimétricas originais de formato analógico, pois no formato digital os respectivos valores de altitude se encontravam incorretos ou eram até mesmo inexistentes (cota zero). Esse processamento se deu a partir da utilização dos programas *ArcGis* 8.2 e *SPRING* 3.6.03, e permitiu a construção dos modelos digitais de elevação. A modelagem numérica seguiu etapas de criação de grades regulares e irregulares e de geração de informações como declividade, orientação e curvatura das vertentes.

A pesquisa abrange, portanto, as informações planialtimétricas existentes no MUBDG (COMDATA, 2001), as quais se referem à aproximadamente a área urbana e de expansão urbana de Goiânia, incluindo também parte da região conurbada com Aparecida de Goiânia (Fig. 5.2). Todos os dados do MUBDG (COMDATA, 2001) são referenciados ao elipsóide UGGI-67, associado ao datum horizontal sul-americano de 1969 (SAD69).

Além da base de dados do MUBDG, foram compiladas, a partir de levantamento bibliográfico, outras informações georreferenciadas da área de estudo, como localização e caracterização de erosões, a partir do Diagnóstico de Processos Erosivos em Goiânia (Nascimento & Sales, 2003); geologia, geomorfologia e materiais de cobertura, a partir da

Carta de Risco do Município de Goiânia, elaborada na escala de 1:40.000 (IPLAN/IBGE/UFG, 1991); e do Diagnóstico Hidrogeológico da região de Goiânia, elaborado na escala de 1:50.000 (Campos et al., 2003).

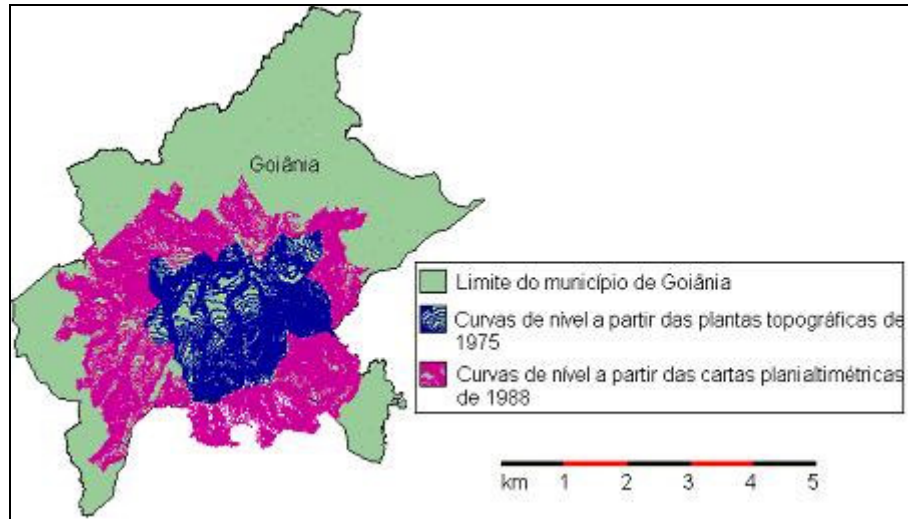


Figura 5.1. Esquema das curvas de nível compiladas da base de dados altimétrica do MUBDG - versão13 (COMDATA, 2001).

A base cartográfica planialtimétrica, em conjunto com as outras informações relativas ao meio físico, faz parte de um banco de dados georreferenciados criado nos programas SPRING v.3.6.03 (Câmara et al., 1996) do INPE, e *ArcGis* 8.2 desenvolvido pela ESRI.

5.1. GERAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDE)

De acordo com Felgueiras (2001), o processo de geração de um modelo numérico de elevação envolve três etapas: a aquisição das amostras, a modelagem e a utilização ou aplicação do modelo.

Como descrito na introdução deste capítulo, as amostras dos dados altimétricos existentes da área de estudo encontram-se representadas pelas curvas de nível, também denominadas curvas de isovalores ou isolinhas de altitude.

Apesar da importância da utilização dessa forma de representação para a modelagem do relevo da área, uma vez que não foi possível a utilização de outros tipos de dados altimétricos, os MDE gerados a partir curvas de nível são de limitada qualidade, quando se propõe a sua modelagem numérica. Para Meijerink et al. (1994), uma das razões dessa qualidade limitada é o padrão de amostragem desfavorável inerente às isolinhas; pois ao longo das linhas a densidade de amostragem é alta e fora dela é praticamente nula.

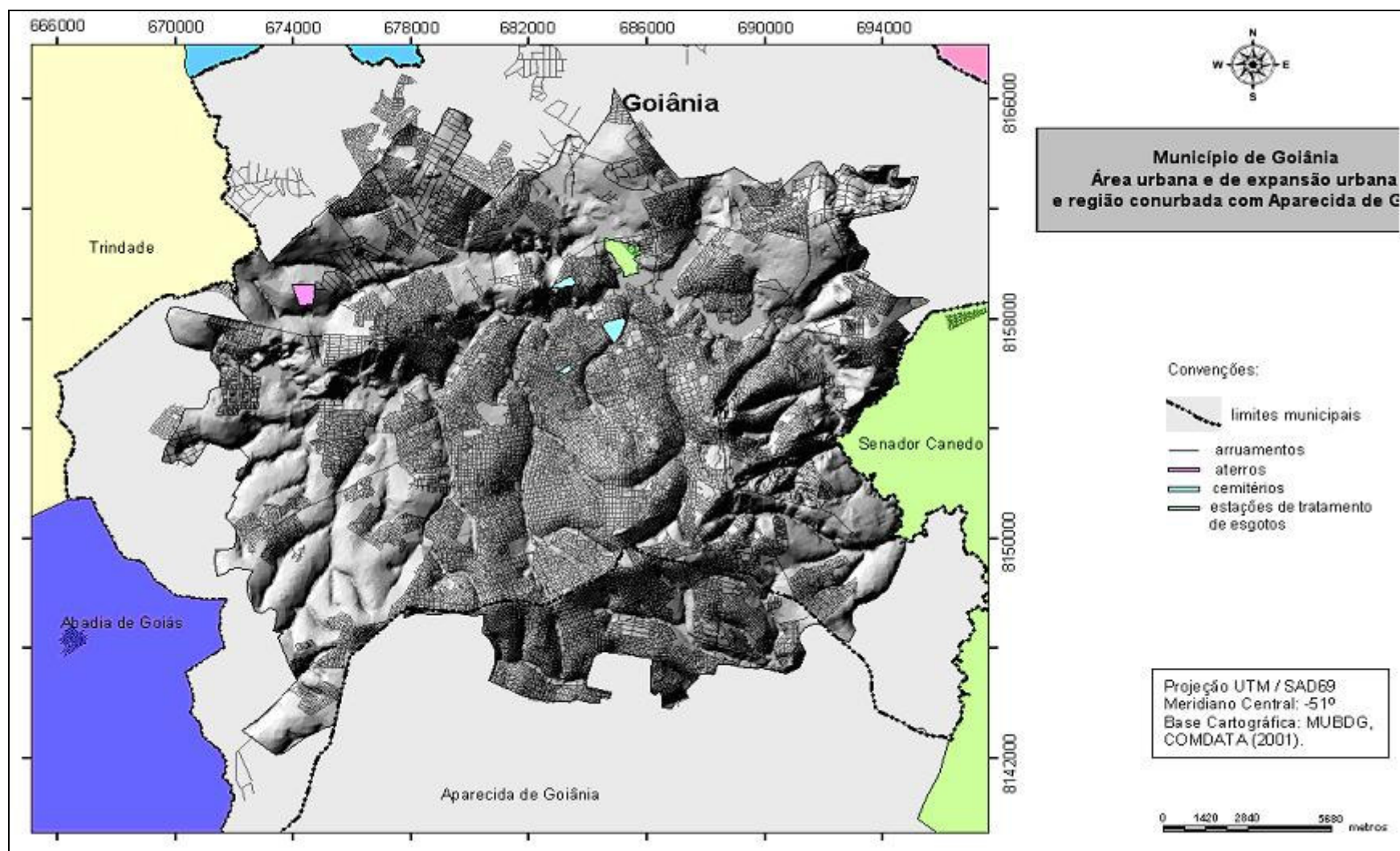


Figura 5.2. Base cartográfica planialtimétrica da área urbana e de expansão urbana de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia, compilada no programa *ArcGis* 8.2.

Segundo Felgueiras (2001), a partir das amostras, o processo de modelagem numérica consiste em operações de criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste, e objetiva com isso a obtenção de uma representação contínua do fenômeno.

Os métodos mais comuns de modelagem de valores altimétricos são aqueles que geram estruturas de grade regular, por funções interpolantes, e os que geram grades irregulares triangulares.

Nesse caso, as grades regulares são geralmente utilizadas em aplicações qualitativas, como ocorre na visualização da superfície em perspectiva, enquanto o modelo de rede triangular irregular (TIN) é utilizado quando se requer maior precisão na análise quantitativa dos dados.

A grade regular retangular é um modelo digital que aproxima superfícies por poliedros de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas localizações x e y que definem a grade desejada. Na estrutura de redes regulares, as altitudes são estimadas nas intersecções da grade, em função dos dados existentes no entorno. É comum a utilização de funções interpolantes locais no cálculo do valor de cota de cada elemento da grade, ou seja, o valor é estimado a partir de um entorno preestabelecido. A interpolação é dita local quando são levadas em conta amostras vizinhas a cada elemento da grade, enquanto a interpolação global utiliza todas as amostras para interpolar cada elemento da grade. A estimativa da elevação é realizada a partir das amostras vizinhas locais, mas uma análise global das amostras é necessária inicialmente, para a análise da vizinhança. O tipo de interpolação varia de acordo com o tipo de amostra. Na interpolação de dados altimétricos é comum a utilização da função local de média ponderada pelo inverso do quadrado da distância (Felicísimo, 1994; Felgueiras, 2001). A estrutura de redes regulares retangulares é utilizada por causa de sua eficiência computacional, entretanto, possui as desvantagens da dificuldade de representação de mudanças abruptas na elevação, além do tamanho da malha da rede poder afetar o resultado da modelagem e a própria eficiência computacional (Moore et al., 1991).

Além disso, podem ser destacadas outras desvantagens da realização da modelagem por meio de grades regulares retangulares a partir das curvas de nível. Burrough & McDonnell (1998) apresentam exemplos de resultados não satisfatórios frequentemente obtidos na tentativa de criar um modelo digital de elevação por meio de métodos de interpolação por média ponderada pelo inverso da distância e por meio de métodos geoestatísticos de krigagem. Do ponto de vista estatístico, o método de interpolação de geração de grade regular por krigagem configura-se como o mais adequado. Porém, na

modelagem de dados altimétricos, esta afirmação nem sempre é válida. A teoria exige que o variograma seja válido para toda a área do MDE, ou seja, que a interdependência entre os dados deve ser função exclusivamente da distância entre eles (da sua posição relativa) e não de sua localização espacial absoluta. Os padrões de variação da elevação devem ser, portanto, homogêneos. E esta condição não permite, por exemplo, o tratamento de discontinuidades topográficas que suponham rupturas de declives (Felicíssimo, 1994). Um dos maiores problemas é o aparecimento das denominadas linhas de tigre, onde regiões muito inclinadas são calculadas em meio a regiões mais planas, gerando patamares em conformação com as isolinhas, escalonando a superfície; outro problema é a geração de uma grande quantidade de dados redundantes em áreas de altitudes uniformes; ou a dificuldade de representação de áreas de diferentes complexidades sem alteração da resolução da grade de representação. Ainda, em regiões mais planas onde as curvas de nível possuem uma geometria muito curva, em um raio com mesmo valor de elevação z , podem ser formados terraços internos. A Fig. 5.3 apresenta uma carta de declividade gerada a partir de um modelo de elevação elaborado pelo método de interpolação por média ponderada, onde essas distorções surgem, em forma de terraços internos e de linhas de tigre.

No modelo da grade irregular triangular TIN, a criação da estrutura da rede não inclui operações de interpolação. São selecionados pontos que melhor representem a altitude do entorno. A estrutura da TIN consiste em um poliedro de faces triangulares, onde os pontos são conectados por linhas para formar triângulos, e em cada vértice são armazenadas as coordenadas de localização (x,y) e o valor de elevação z . Quanto mais equiláteras forem as facetas, a descrição da superfície será mais próxima à realidade. A modelagem é realizada em relação às arestas dos triângulos, permitindo uma grande quantidade de informação em regiões de relevo complexo, sem a necessidade de dados redundantes em áreas de relevo mais simples. Conseqüentemente, permite-se a inclusão de informações morfológicas da superfície importantes, preservando discontinuidades como quebras positivas e negativas, e vales. Desse modo, dentre as vantagens da modelagem do relevo em redes triangulares irregulares está a maior eficiência no cálculo do gradiente do relevo (Fernandes & Menezes, 2005; Felgueiras, 2001; Burrough & McDonnell, 1998).

A partir da utilização do programa SPRING 3.6.03, a modelagem em grade irregular triangular seguiu o método da triangulação de *Delaunay*. Nesse método, em áreas de terreno mais complexo é necessária uma amostragem maior, e em áreas planas são necessários poucos pontos.

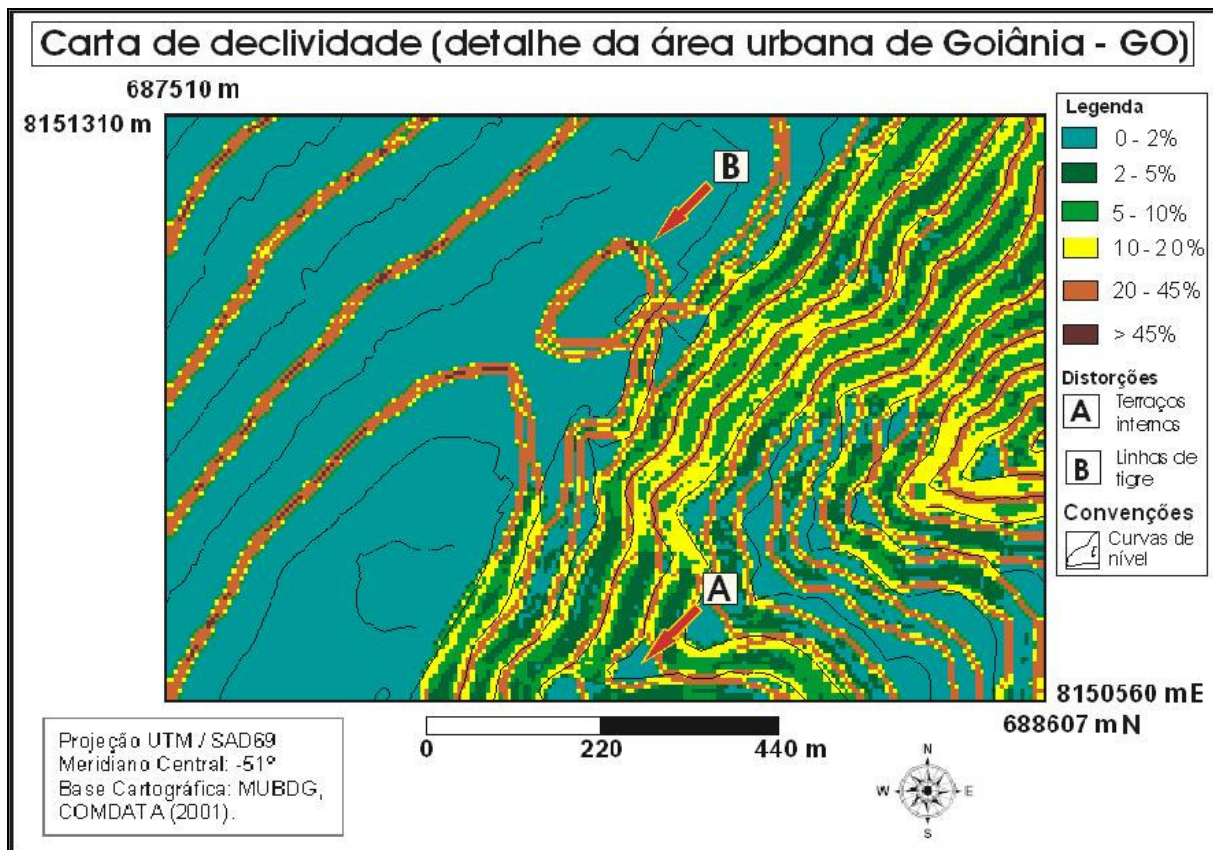


Figura 5.3. Detalhe de uma carta de declividade com destaque às distorções geradas na modelagem dos dados altimétricos.

A triangulação de *Delaunay* minimiza as diferenças nos ângulos do triângulo e também os comprimentos dos lados. Consiste em um método de critério de distância linear, gerando uma rede triangular irregular (TIN). A superfície do terreno é amostrada por nós que estão localizados em posições que capturam as características do terreno, onde três nós são os pontos referenciais para as facetas triangulares. O critério utilizado na triangulação de *Delaunay* busca triângulos o mais próximo possível de equiláteros, evitando triângulos com ângulos internos muito agudos. A implementação desse critério pode ser realizada de forma equivalente pelo critério do circuncírculo, em que o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha contém, internamente, somente os vértices do triângulo em questão, do conjunto das amostras (Felgueiras, 2001; Meijerink et al., 1994). No programa SPRING / INPE, no caso das curvas de nível que em geral possuem muitos pontos por linha, pode-se utilizar um algoritmo de generalização cartográfica, eliminando informações redundantes, ou seja, eliminando os pontos em excesso das linhas, por meio do algoritmo de *Douglas-Peucker* (Namikawa et al., 2003).

Uma vez processado o MDE da área de estudos, nos programas *ArcGis* 8.2 e *SPRING* 3.6.03, no formato de grade irregular triangular (TIN), utilizando-se a drenagem como linhas que preservam as características topográficas do terreno, elaborou-se a partir dele as cartas hipsométrica, de declividade e de orientação. No programa *ArcGis* 8.2 foi necessária a geração da grade regular para a realização de outras operações, como o cálculo das curvaturas, plana e do perfil. Nesse caso, com a finalidade de se minimizar o escalonamento da superfície, a modelagem da elevação consistiu inicialmente na modelagem por meio da estrutura de rede triangular irregular (TIN).

5.2. CARTAS DE DECLIVIDADE E ORIENTAÇÃO

A função de cálculo da declividade e orientação de vertentes identifica o máximo coeficiente de variação no valor z de cada célula, em relação a sua vizinhança. Uma grade é criada, a partir de dados de elevação, com os valores do gradiente em porcentagens, graus ou radianos. Quando o ângulo de máxima inclinação tende a 90° , o valor da declividade em porcentagem tende a um valor infinito. Já os valores de orientação variam entre 0 e 360° . Um valor negativo (-1) indica uma área de orientação não definida, ou seja, o valor da célula de entrada tem inclinação zero (área plana). As cartas de declividade em valores de porcentagem (gradiente %) e de orientação de vertentes em graus, apresentadas na Fig.5.4 e na Fig. 5.5, foram geradas a partir de processamento realizado no programa *ArcGis* v.8.2.

A altitude do entorno imediato ao ponto central, onde são calculados os valores de máxima inclinação e da orientação das vertentes, pode ser descrita de forma aproximada por meio de um plano de ajuste (Eq.5.1),

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \quad (5.1)$$

onde a_{00} é um valor constante, e a_{10} e a_{01} coeficientes angulares, que são as derivadas de primeira ordem da altitude z em relação a x e y , ou seja (Eq. 5.2 e 5.3),

$$\partial z / \partial x = a_{10} \quad (5.2)$$

e

$$\partial z / \partial y = a_{01} \quad (5.3)$$

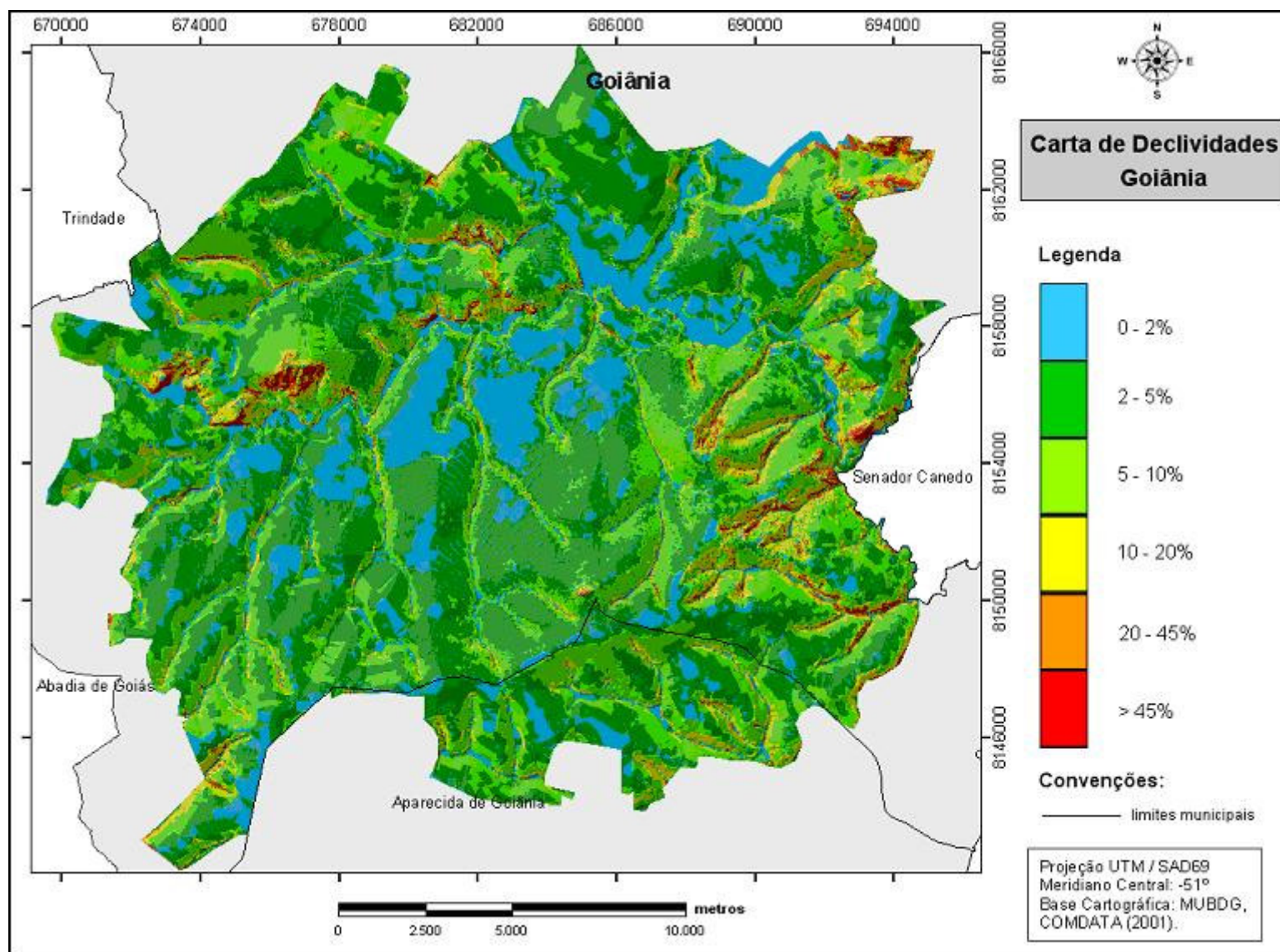


Figura 5.4. Carta de declividades das áreas urbana, de expansão urbana do município de Goiânia e conurbadas com Aparecida de Goiânia.

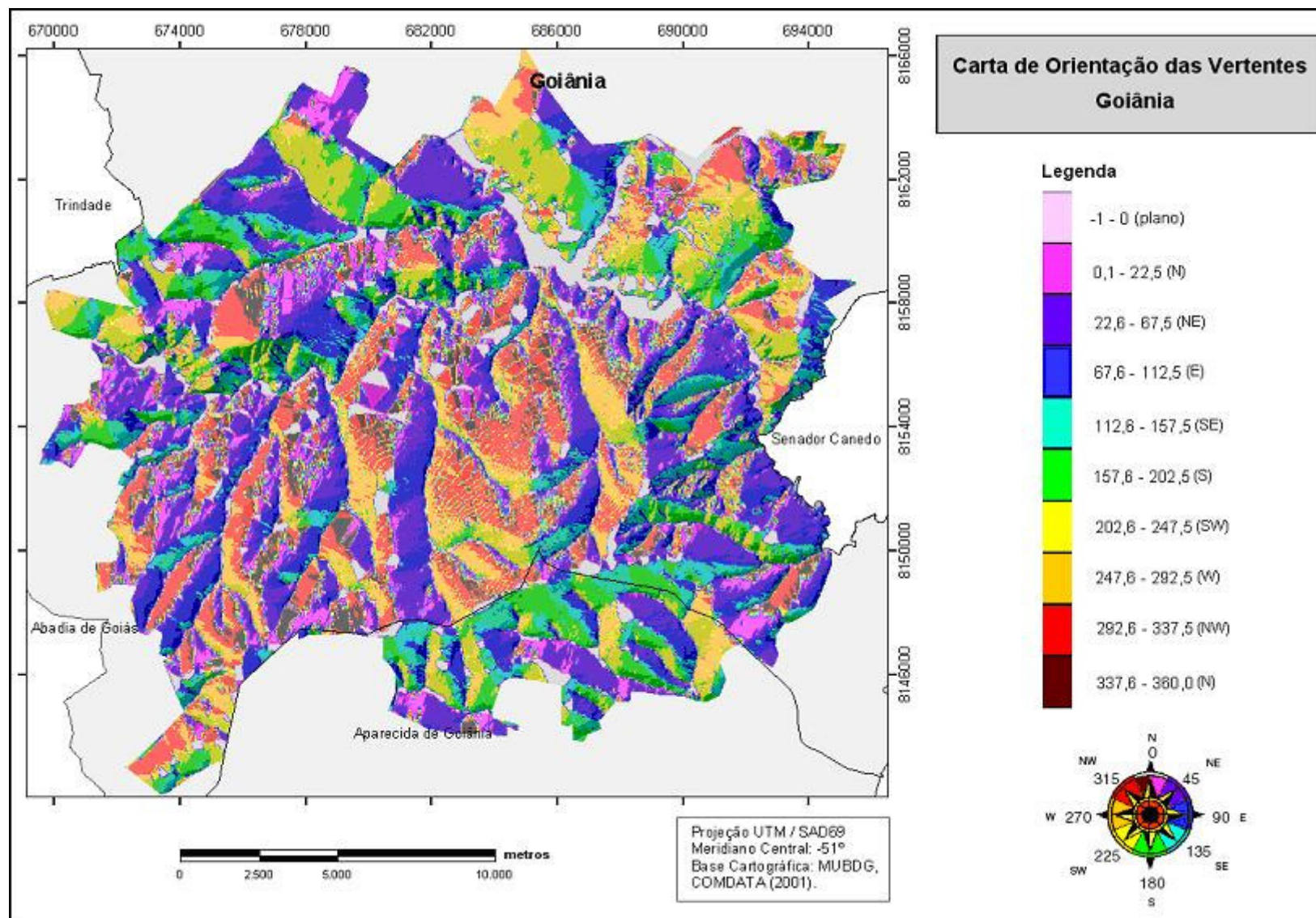


Figura 5.5. Carta de orientação das vertentes das áreas urbana, de expansão urbana de Goiânia e conurbadas com Aparecida de Goiânia.

representando componentes da inclinação sobre os eixos x e y , respectivamente (Felicísimo, 1994).

Os valores de máxima inclinação e da orientação das vertentes são calculados para a vizinhança de 3x3 células, utilizando a técnica da estimativa da média máxima, descrita a partir de Horn (1981), no Cap. 3. As derivadas são calculadas utilizando uma matriz de convolução dessa dimensão 3x3, em relação aos valores de elevação z em torno da célula central.

Assim, nos programas SPRING/INPE 3.6.03 e ArcGis v.8.2, conceitualmente, a função declividade ajusta um plano aos valores de uma vizinhança de 3x3 células em torno da célula central (célula de processamento), para o cálculo da máxima inclinação e da orientação das vertentes. Segundo Felgueiras (2001), quando a superfície está representada por um MDE de grade irregular triangular, os componentes do vetor gradiente (declividade e orientação) são calculados a partir de uma superfície de ajuste para cada triângulo, obtendo-se assim as derivadas parciais da equação do plano que passa pelos vértices do triângulo.

A declividade em porcentagem (gradiente %) é calculada para a área por meio do algoritmo desenvolvido a partir das equações apresentadas no Cap.4, baseado em Horn (1981). Em resumo, a declividade (gradiente) e a orientação das vertentes são calculadas a partir das expressões da Eq. 5.4, Eq. 5.5, Eq. 5.6 e Eq. 5.7.

$$gradiente(\%) = 100(\tan \theta) = 100 \left\{ \left[(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (5.4)$$

$$a_{10} = (\partial z / \partial x) = [(z_{++} + 2z_{+o} + z_{+-}) - (z_{-+} + 2z_{-o} + z_{--})] / 8\Delta x \quad (5.5)$$

$$a_{01} = (\partial z / \partial y) = [(z_{++} + 2z_{o+} + z_{-+}) - (z_{+-} + 2z_{o-} + z_{--})] / 8\Delta y \quad (5.6)$$

$$orientação(^{\circ}) = \phi = \arctan \left(-\frac{\partial z}{\partial y} / \frac{\partial z}{\partial x} \right), -\pi < \phi < \pi \quad (5.7)$$

Onde Δx é o espaçamento da malha na direção do eixo x , Δy , na direção do eixo y e θ é o ângulo da reta de maior inclinação, em relação à horizontal, do plano de ajuste. Na área de estudo, o espaçamento da malha foi adotado como de 5 m em ambas as direções ($\Delta x = \Delta y = 5m$).

5.3. CARTAS DE CURVATURA PLANA E DO PERFIL

Para o cálculo da curvatura, matematicamente considerada como a segunda derivada da superfície, o programa utilizado (ArcGis 8.2), segundo McCoy & Johnston (2002), parte de

uma equação quadrática, representando essa superfície, conforme a Eq.5.8 (descrita no Cap. 3):

$$z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (5.8)$$

E, para o cálculo da curvatura média geral a função no programa *ArcGis* 8.2 (McCoy & Johnston, 2002) é calculada em porcentagem (Eq. 5.9):

$$\eta = -2(D + E) * 100 \quad (5.9)$$

Conforme apresentado no Cap.3, a curvatura média geral pode ser decomposta em dois componentes ortogonais relativos à curvatura do perfil η_{perfil} e à curvatura plana η_{plana} (Burrough & McDonnell, 1998), segundo as expressões em porcentagem por metro (Eq. 5.10 e Eq. 5.11):

$$\eta_{perfil} = 100 \left[\frac{-2(DG^2 + EH^2 + FGH)}{(G^2 + H^2)} \right] \quad (5.10)$$

$$\eta_{plana} = 100 \left[\frac{2(DH^2 + EG^2 - FGH)}{(G^2 + H^2)} \right] \quad (5.11)$$

Quanto aos valores resultantes de convexidade ou concavidade de uma superfície, um valor de curvatura positivo indica que a superfície exposta é convexa e o negativo, que é côncava, em cada célula. E o valor zero indica que a superfície é plana. Segundo McCoy & Johnston (2002), a partir da utilização da função curvatura disponível no programa *ArcGis* 8.2, pode-se esperar para um relevo classificado como moderado, denominado de colinoso, valores de curvatura entre -0,5 e 0,5, enquanto para áreas mais inclinadas, denominadas montanhosas, os valores podem variar entre -4 e 4.

A utilização da equação quadrática para a análise da superfície do terreno assume que a superfície representada pela matriz de altitude tem uma primeira derivada contínua. Embora isso seja razoável para a maioria das superfícies do terreno, como já destacado, podem ocorrer discontinuidades na inclinação da vertente. Isso é mais problemático quando o espaçamento da malha é maior que as feições do relevo, como feições relativas a quebras de relevo ao longo das margens de rios, como é o caso de calhas muito encaixadas (Zevenbergebm & Thorne, 1987).

Na geração da carta de curvatura plana e da carta de curvatura do perfil as sub-rotinas presentes no programa *ArcGis* 8.2 foram utilizadas. Também foram geradas as cartas denominadas nesta pesquisa de cartas de curvaturas, em que as nove curvaturas são representadas, com a realização de operações de intersecção entre as cartas de curvatura do

perfil e curvatura plana. Os produtos elaborados são apresentados da Fig. 5.6 à Fig. 5.27. Variou-se a resolução espacial das cartas, desde 5, 10, 25, 50, 100, até 250 x 250 m (tamanho da célula da matriz). São representadas também cartas onde os limites foram generalizados, transformando o formato matricial em formato vetorial. Os valores mapeados de curvatura foram definidos somente em três classes de curvatura, tanto a plana como a do perfil: curvaturas convexas, retilíneas e côncavas, classificadas como positivas, iguais a zero, ou negativas. Para que fossem delimitadas regiões de vertentes convexas, retilíneas ou côncavas, variou-se a resolução das cartas, conforme os produtos apresentados em alto relevo para melhor visualização e análise.

A análise da curvatura da vertente torna-se importante na distinção de feições diagnósticas de processos erosionais ou deposicionais. As cartas de curvaturas planas e do perfil geradas apresentam respostas diferenciadas em sua modelagem, de acordo com as resoluções espaciais, relacionadas à escala de análise, a qual se adequa a cada tipo de informação que se quer gerar.

Na análise das figuras relativas às cartas de curvaturas geradas em distintas e progressivas resoluções espaciais, nesta pesquisa observa-se que: as cartas com resoluções espaciais menores, como por exemplo, as cartas com tamanho da célula da matriz do modelo de elevações de 5 x 5 m, 10 x 10 m e 25 x 25 m, apresentam fragmentos classificados como curvaturas convexas ou côncavas, em descontinuidade, que se devem ou a pequenas descontinuidades na vertente, dependendo da escala, ou a erros inerentes à modelagem digital das elevações na superfície do terreno. Isso ocorre para ambas curvaturas, planas e do perfil, apesar de não serem simétricas as variações tanto para as concavidades como para as convexidades, como também observou Wood (1996), na análise da variação do padrão de curvatura, para um mesmo local modelado em diferentes escalas.

Com o objetivo de mostrar com exemplos práticos como esses modelos podem ser criados e utilizados, Wood (1996) observou que a escala na qual as redes são bem conectadas parecem mais detalhadas para as convexidades do que para as concavidades. Em determinadas escalas, por exemplo, as quebras positivas parecem bem definidas enquanto os canais são representados com descontinuidade. Para o caso das curvaturas relativas ao perfil, é possível observar ainda que, nas menores resoluções espaciais, os canais principais são delineados de forma descontínua, enquanto ao longo das linhas de maior inclinação os fragmentos intercalam-se em partes convexas e côncavas, seguindo a conformação das curvas de nível.

Já nas regiões onde os interflúvios (regiões entre os vales) são menores e os vales mais encaixados, configurando áreas mais dissecadas, os canais se mostram mais contínuos e as partes convexas e côncavas das vertentes são melhores delineadas. Esse fato pode ser observado na parte centro-leste da área de pesquisa, próximo ao limite com o município de Senador Canedo, onde as vertentes apresentam-se em maiores altitudes convexas e nas regiões mais próximas aos vales, mais côncavas.

Por outro lado, em resoluções espaciais maiores, a maior parte das feições é delineada de melhor forma, visto que a área de estudos é relativamente plana em sua maioria. Na região do Morro do Mendanha (região mais alta próxima ao limite com o município de Trindade), por exemplo, as partes mais côncavas do perfil, em média e baixa vertente, são melhor delimitadas.

Em relação à curvatura plana, quanto menor a resolução espacial, mais as reentrâncias na conformação das curvas de nível são destacadas. As quebras positivas do terreno são detectadas e as vertentes mostram muitos sulcos ao longo das linhas de maior inclinação. De novo, nesse caso para as curvaturas planas, nas regiões mais dissecadas delineiam-se melhor (com menos fragmentos) as cristas, os canais afluentes e os canais principais.

Progressivamente, para as cartas com tamanho de células maiores, os elementos morfométricos mais expressivos para a área de pesquisa são mais percebidos e facilmente definidos. A resolução em que ocorre a melhor definição dos elementos depende da extensão desse elemento. Para a área em questão, nas resoluções espaciais de 50 m e 100 m, os canais principais começam a aparecer mais conectados. Na resolução espacial de 100 m, a rede de vales é representada quase que inteiramente conectada na carta de curvaturas do perfil.

Os modelos elaborados em maior resolução tiveram seus limites suavizados, ou seja, generalizados, pois o formato matricial (raster) utilizado para a modelagem das curvaturas pelo programa computacional gera limites segundo o tamanho das células.

A resolução de 250 m, na qual também foram elaboradas as cartas de curvaturas planas e do perfil, já não se apresentou satisfatória ao padrão de curvaturas existentes na área. A modelagem nessa resolução já oblitera em muito as menores feições. Além disso, percebe-se da comparação com a carta de declividades que até as áreas mais planas, que deveriam ter sido classificadas como retilíneas, tiveram seus limites subdimensionados.

Assim, é possível observar a partir da Fig. 5.18 até a Fig. 5.21 os produtos elaborados da intersecção das cartas de curvaturas planas com as curvaturas do perfil das vertentes, em que as nove curvaturas geradas com esse processamento, de igual modo, delimitam-se melhor para a maioria das feições existentes na área de estudos, nas resoluções de 50 e 100 m.

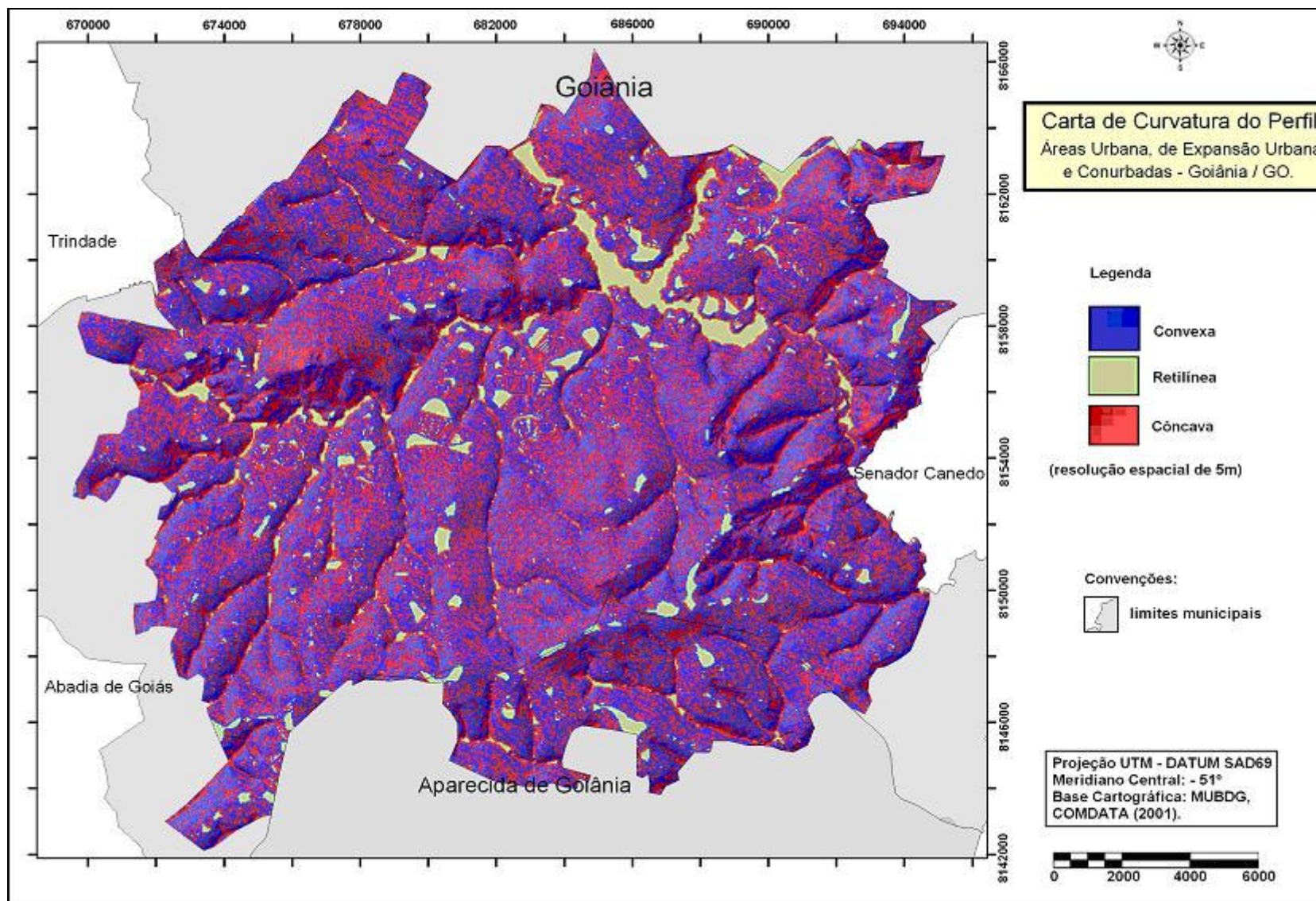


Figura 5.6. Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 5x5 m.

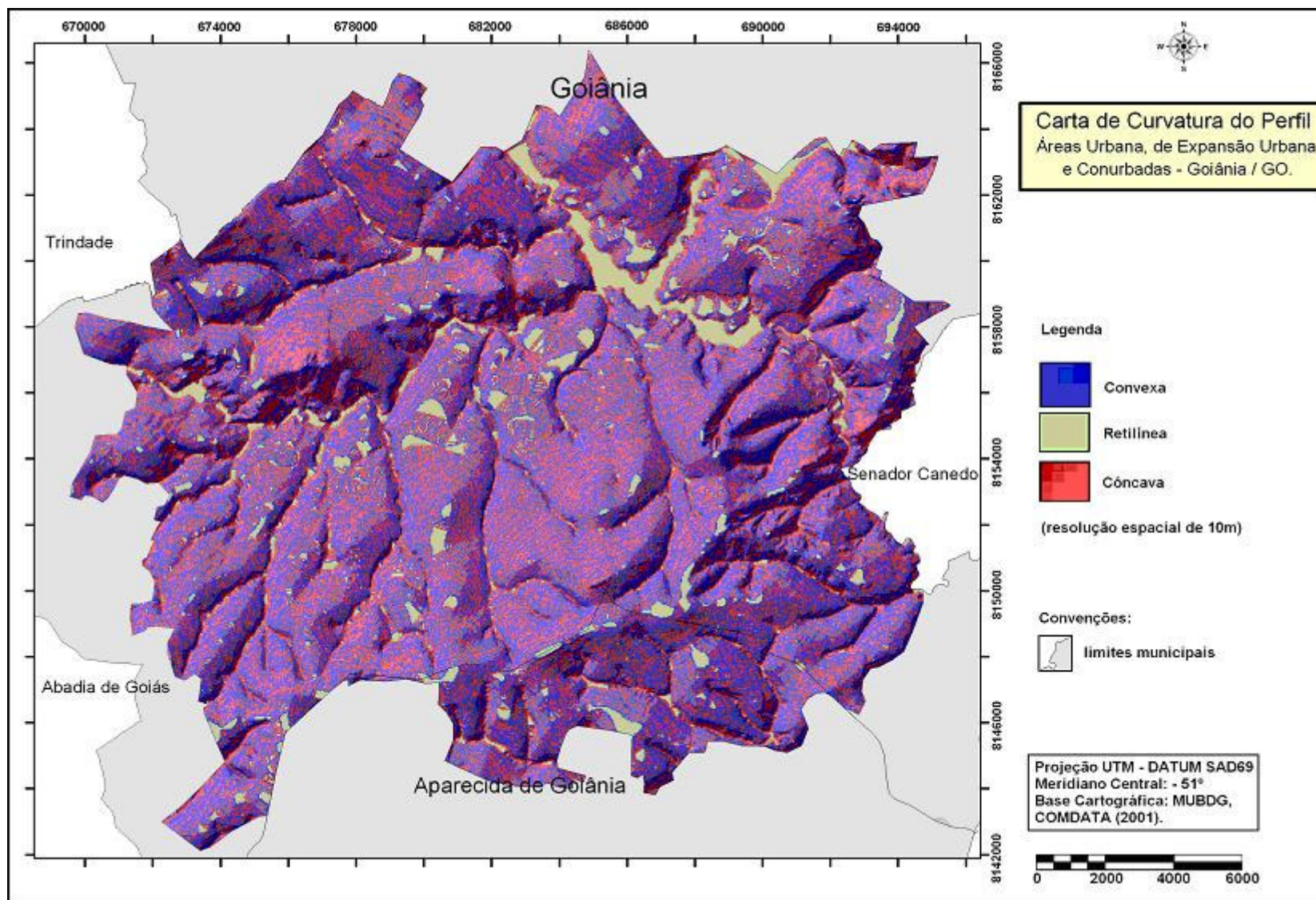


Figura 5.7. Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 10x10 m.

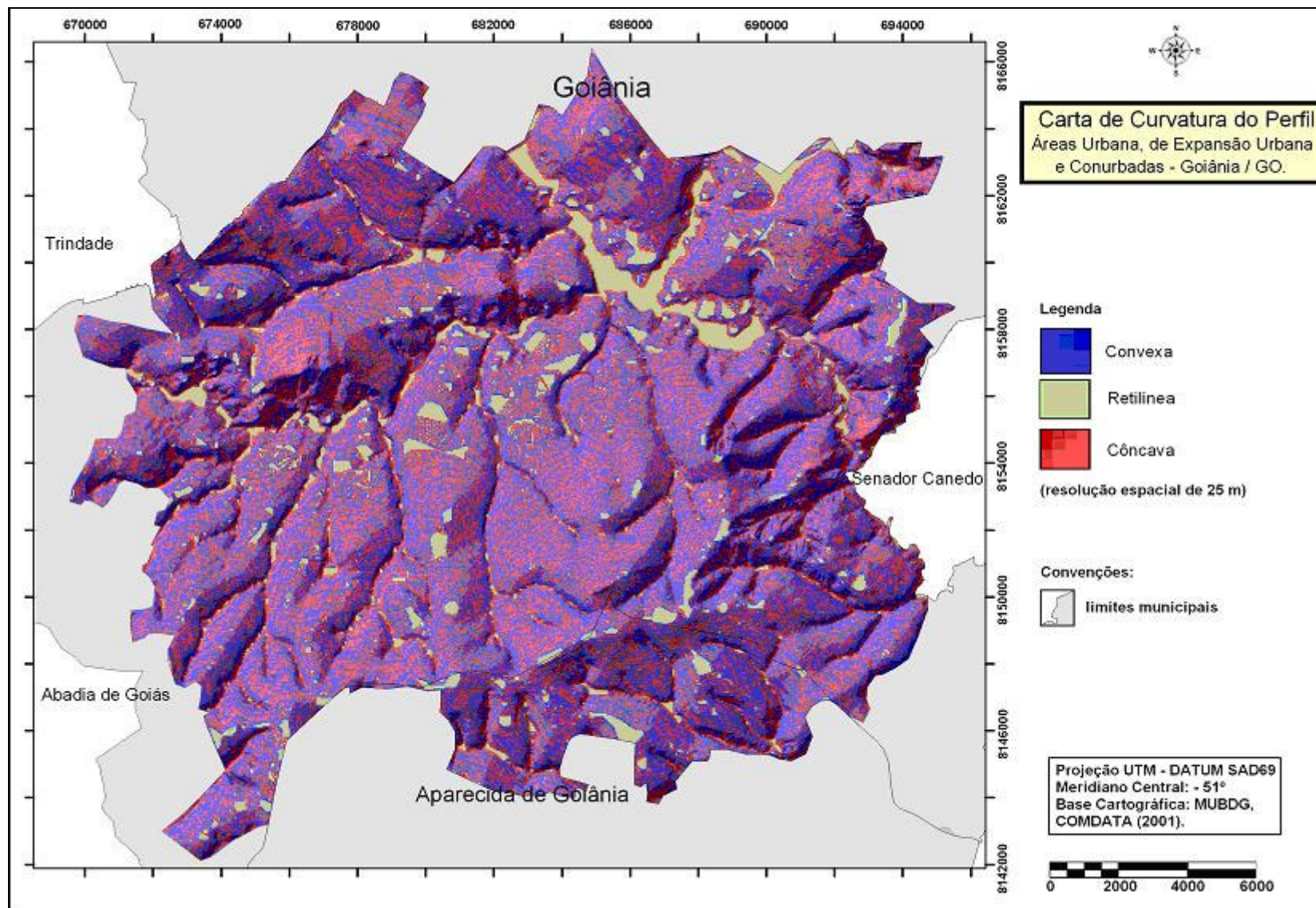


Figura 5.8. Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 25x25 m.

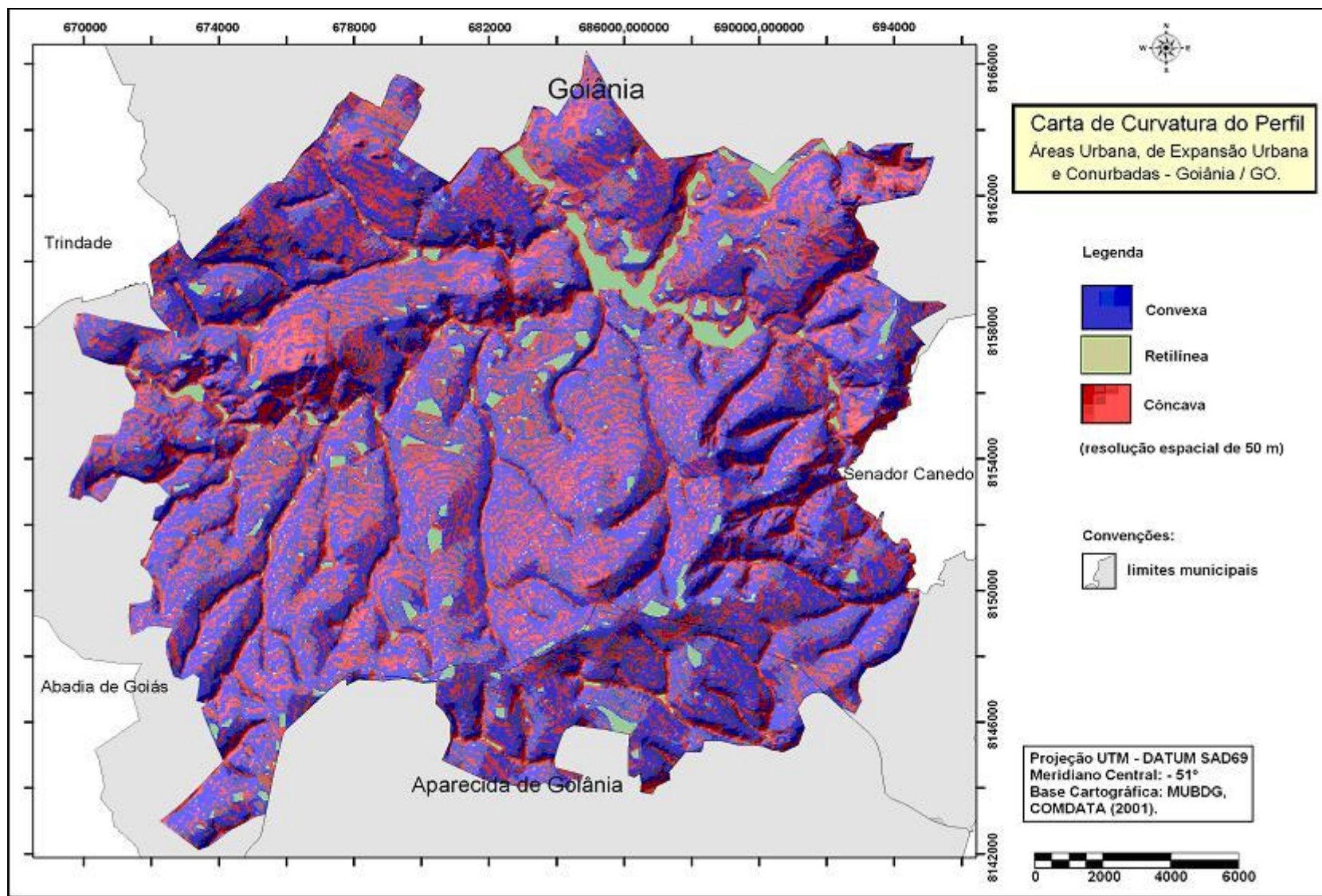


Figura 5.9. Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 50x50 m, com limites dos polígonos generalizados.

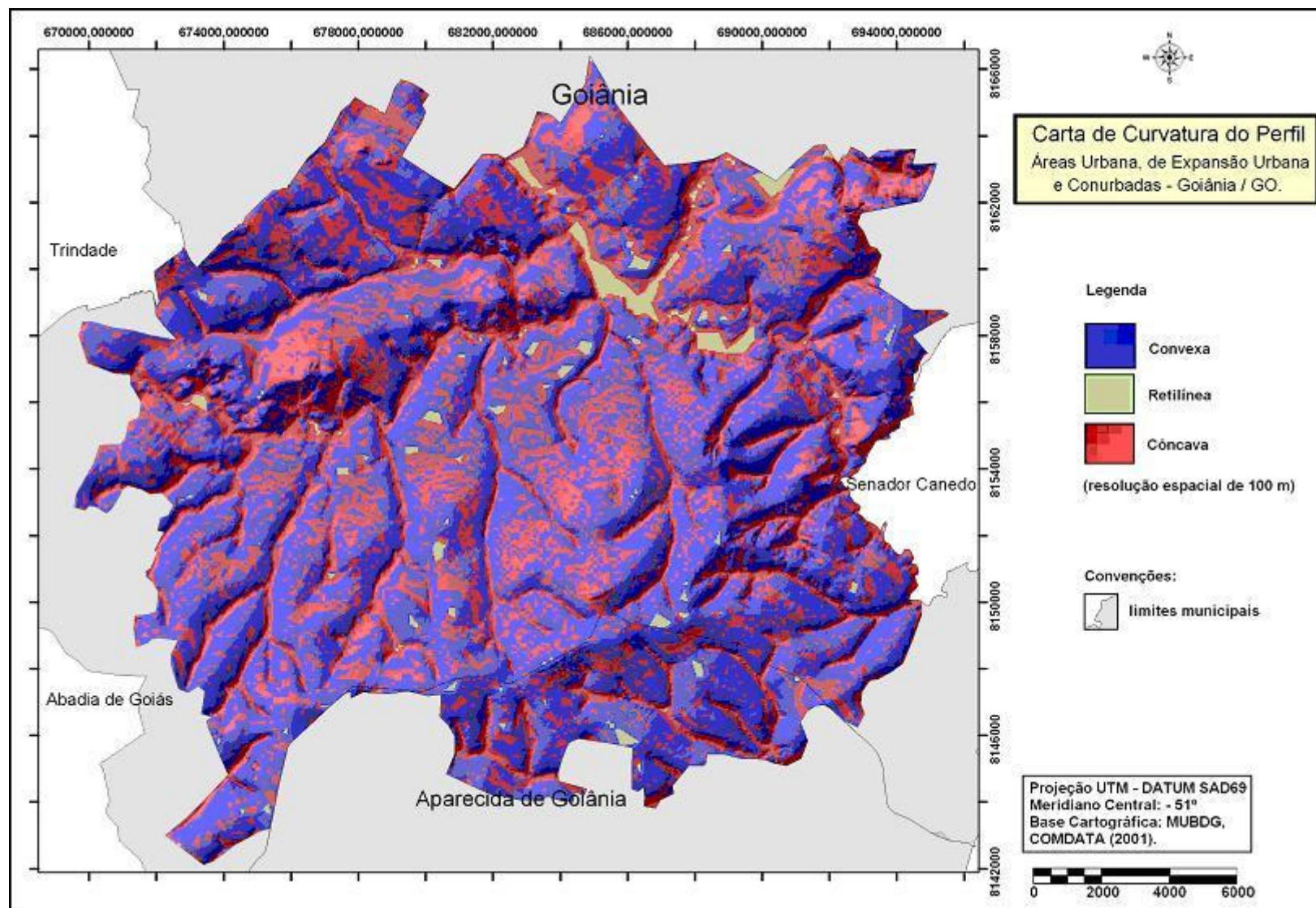


Figura 5.10. Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 100x100 m, com limites dos polígonos generalizados.

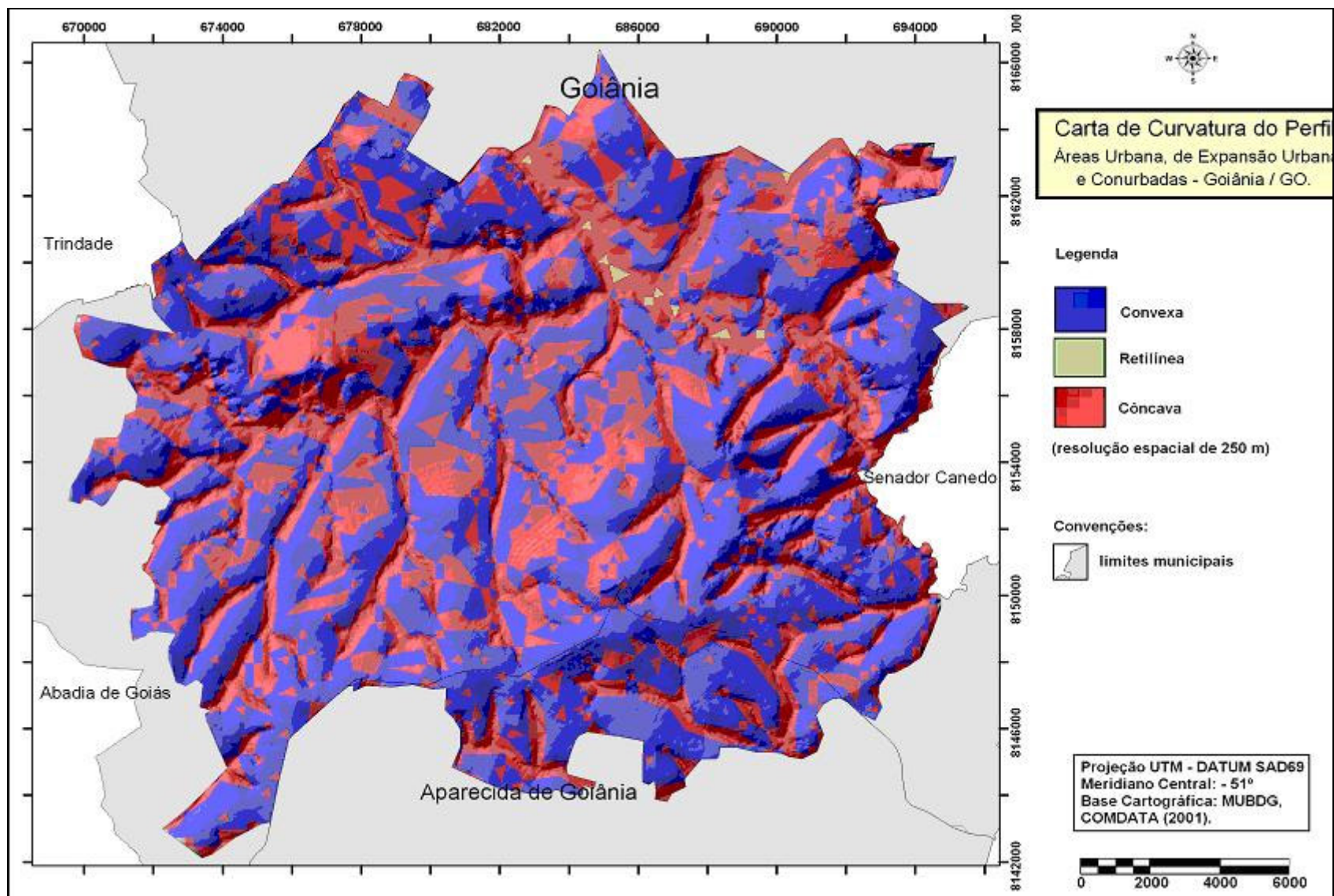


Figura 5.11. Carta de curvatura do perfil das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 250x250 m, com limites dos polígonos generalizados.

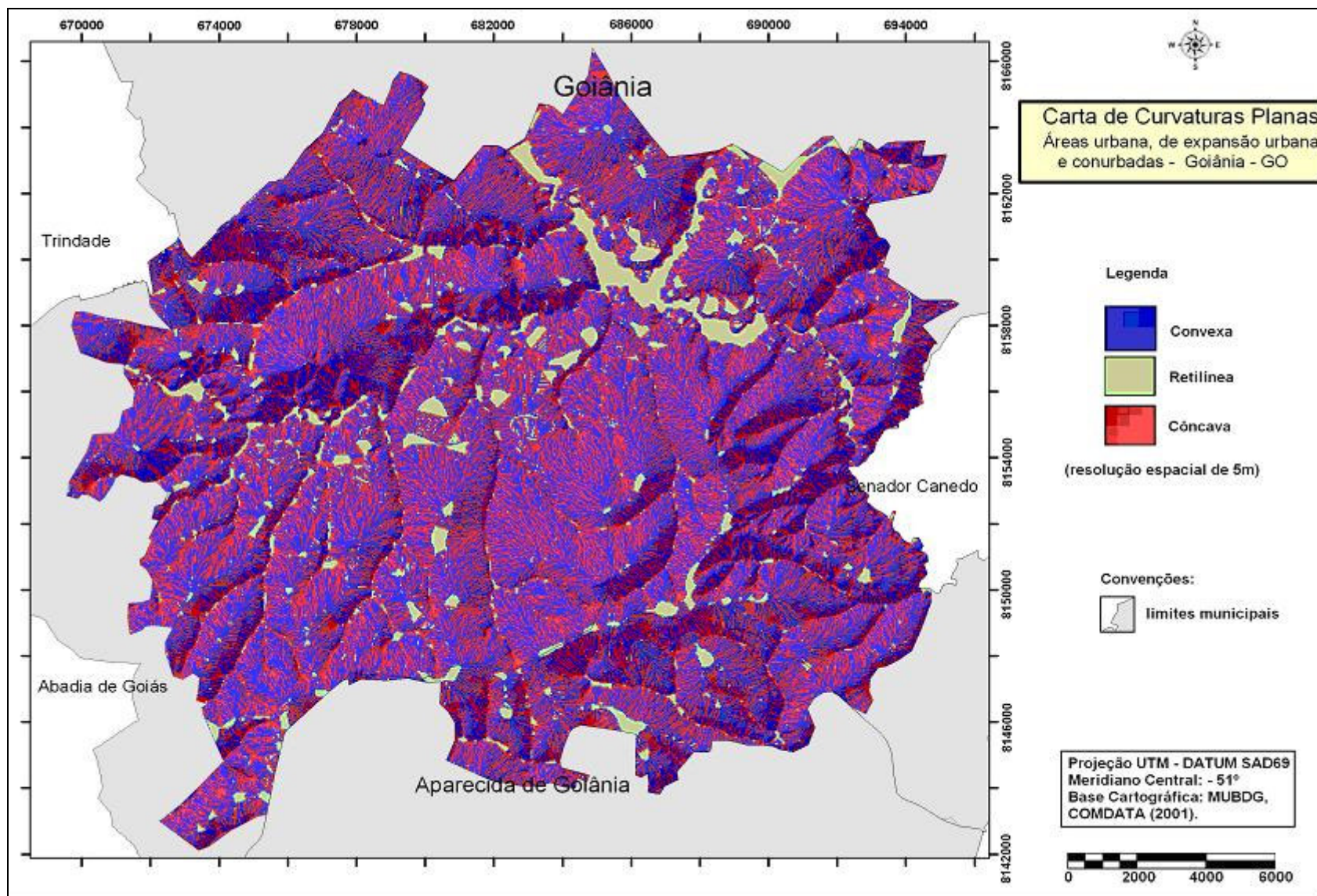


Figura 5.12. Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 5x5 m.

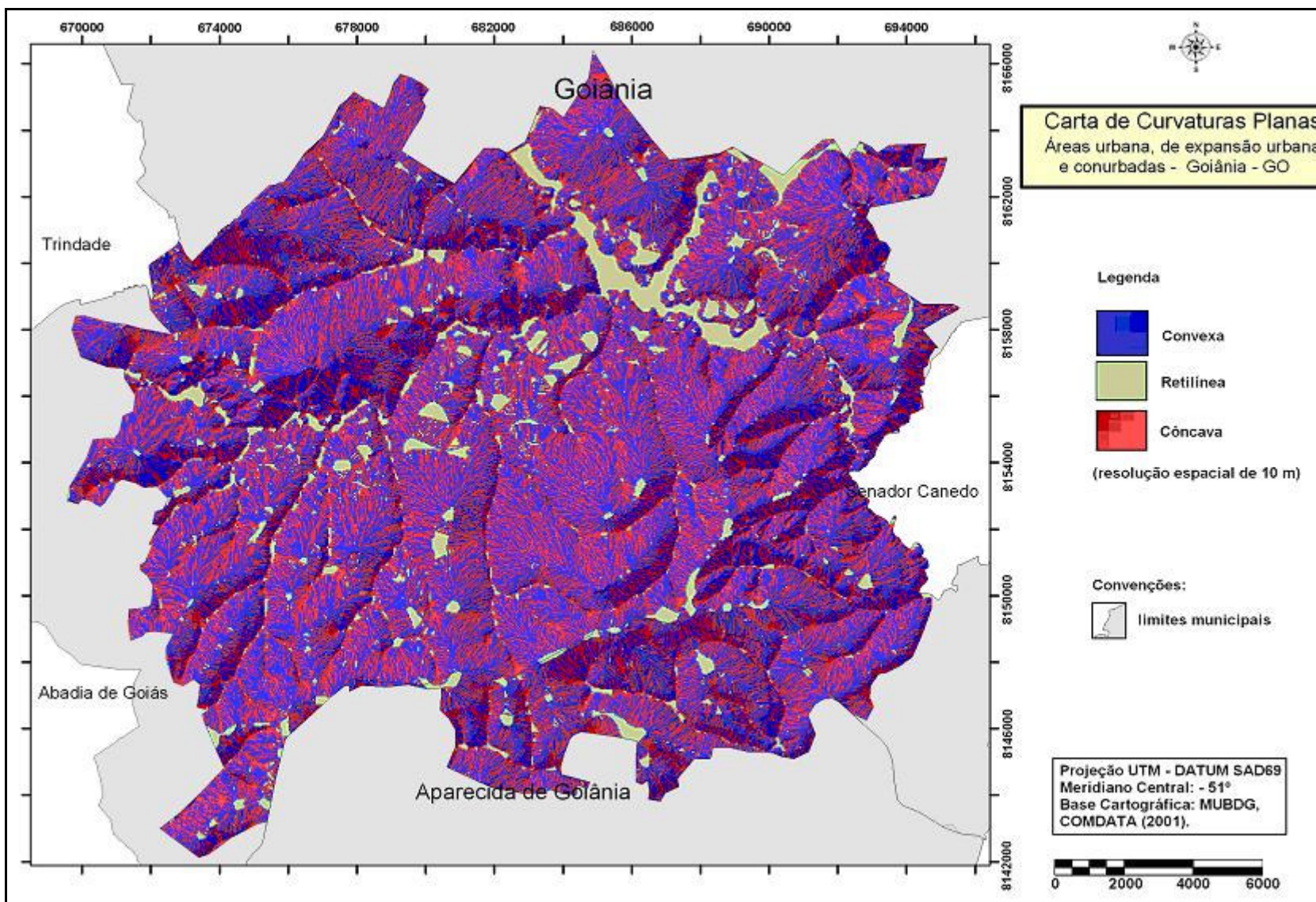


Figura 5.13. Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 10x10 m.

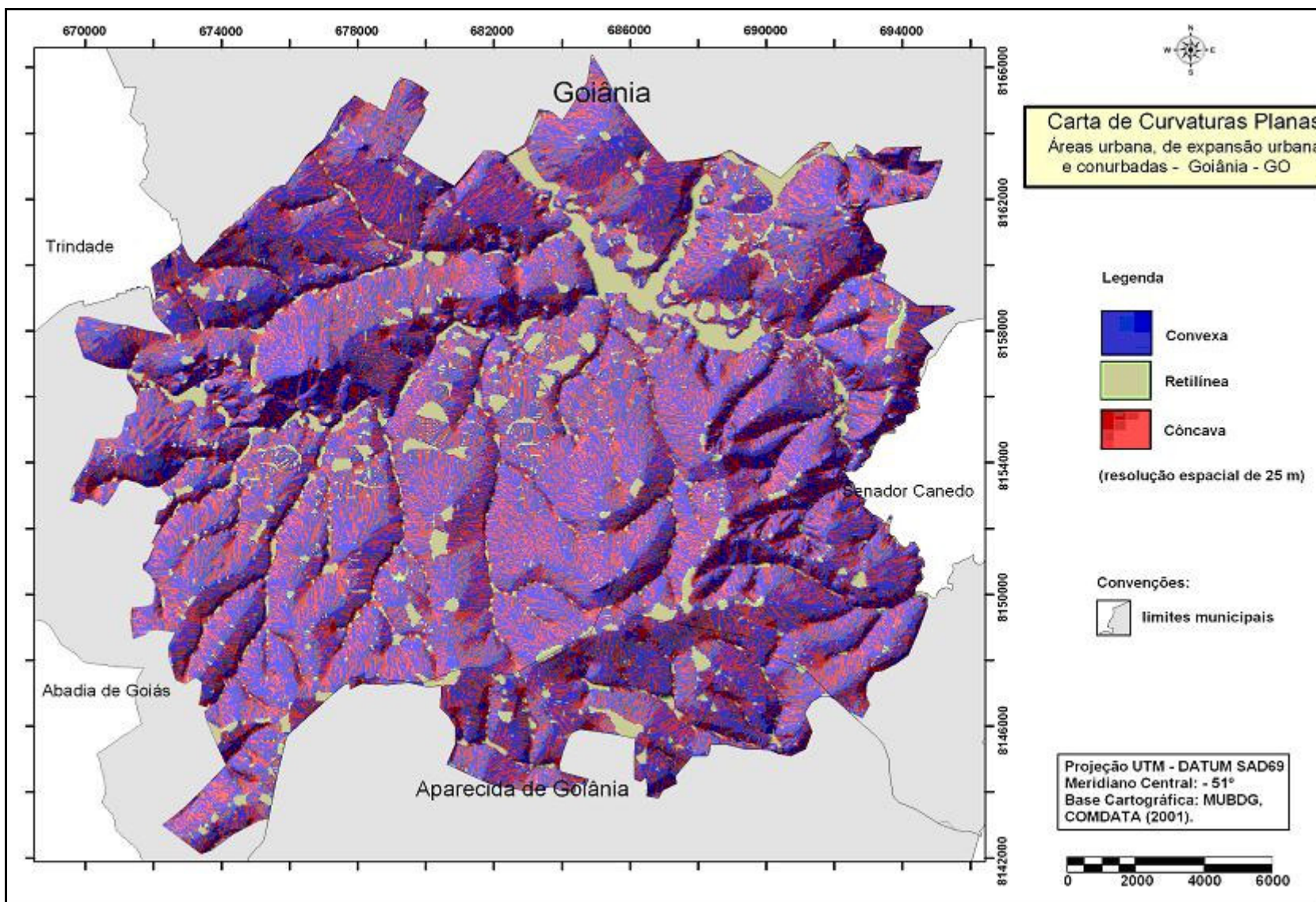


Figura 5.14. Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 25x25 m.

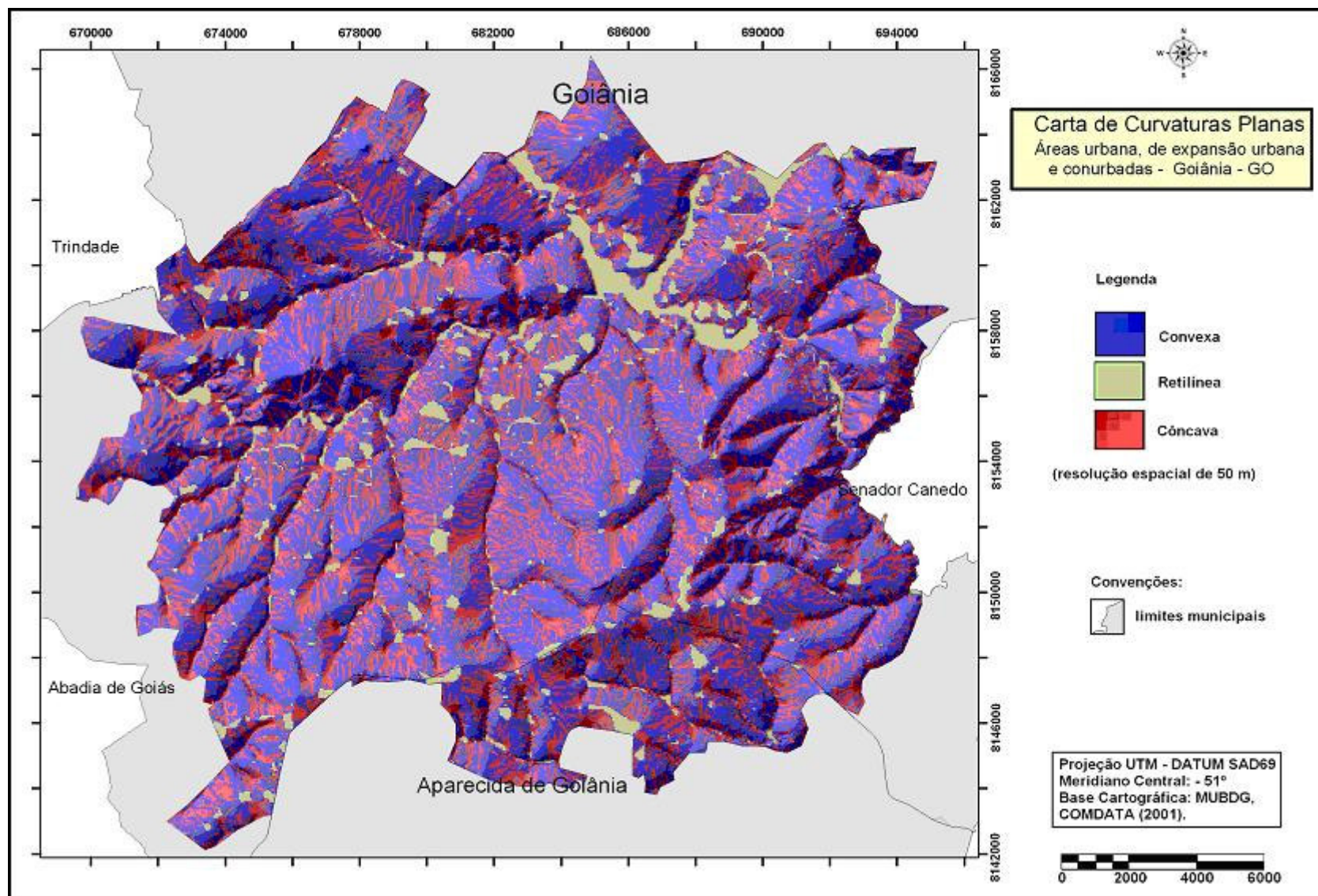


Figura 5.15. Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 50x50 m, com limites dos polígonos generalizados.

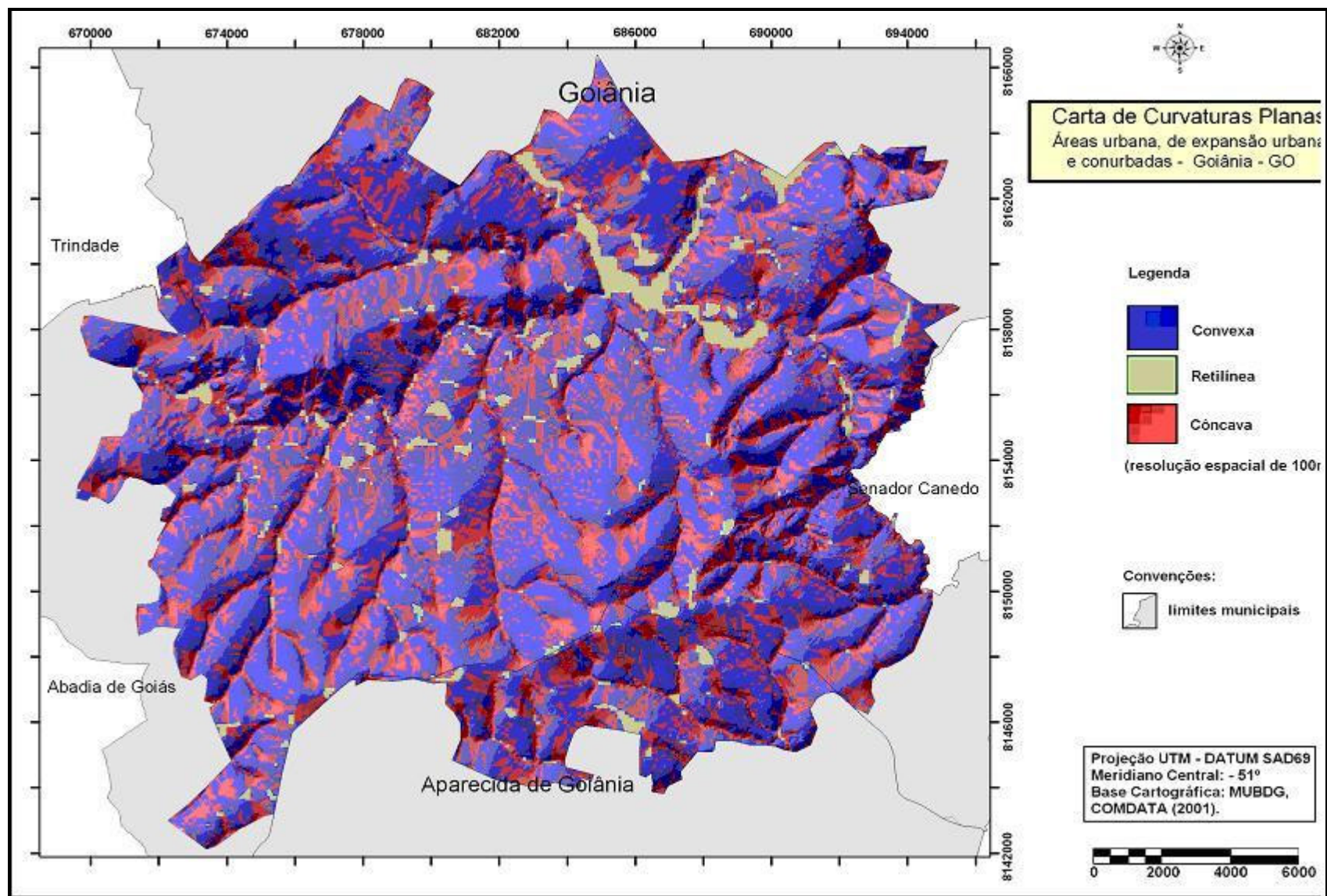


Figura 5.16. Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 100x100 m, com limites dos polígonos generalizados.

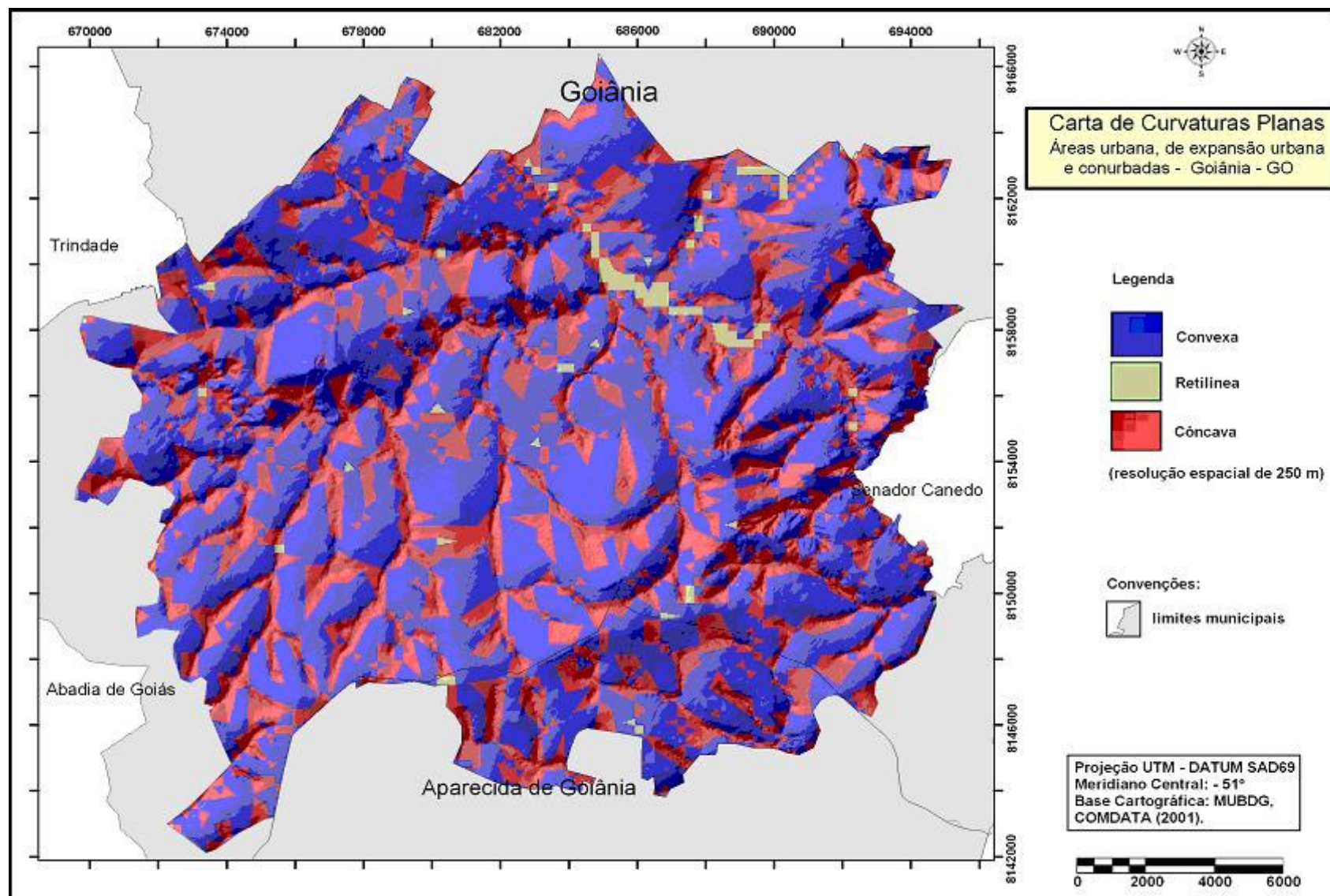


Figura 5.17. Carta de curvaturas planas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 250x250 m, com limites dos polígonos generalizados.

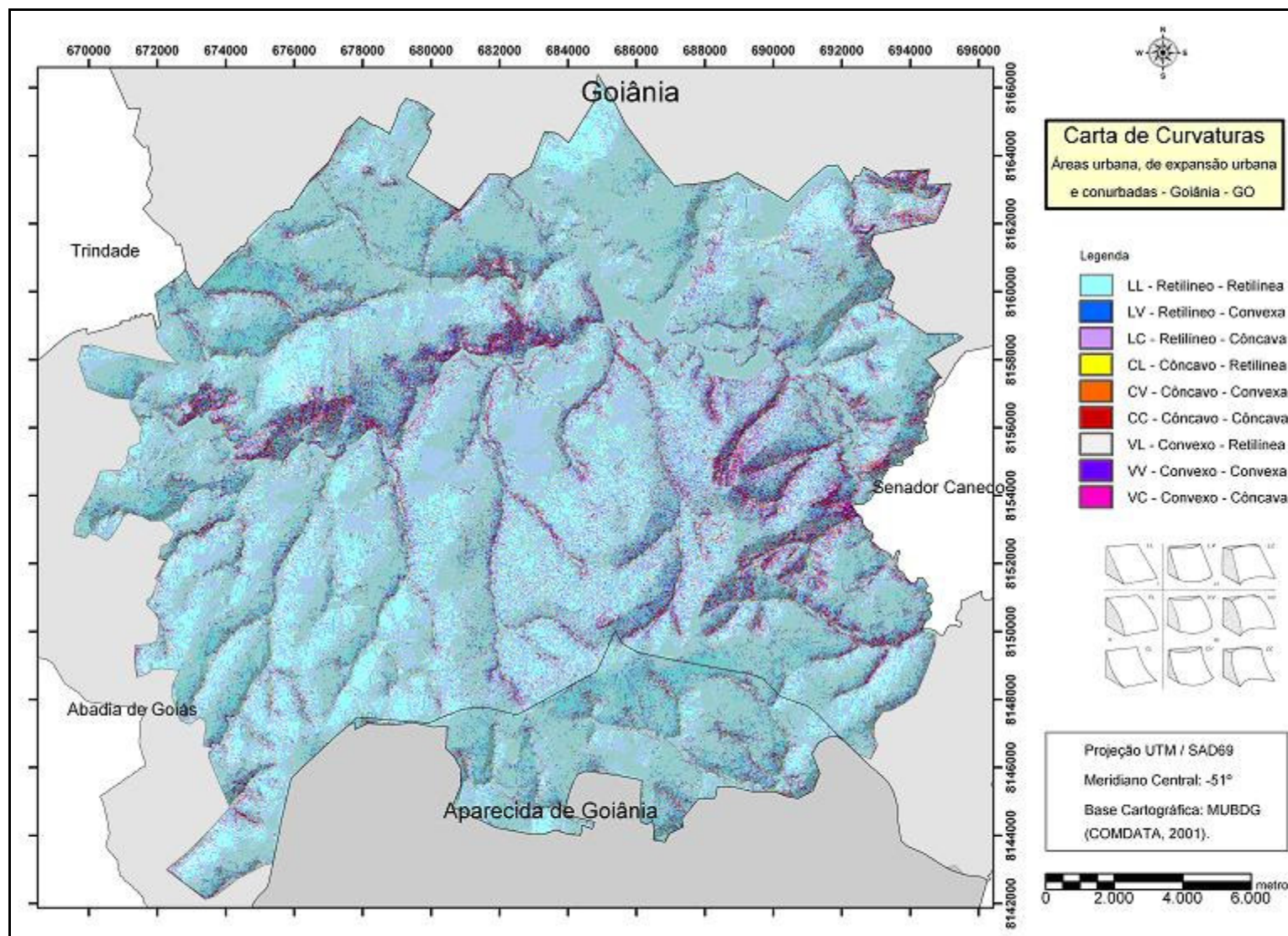


Figura 5.18. Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 5x5 m.

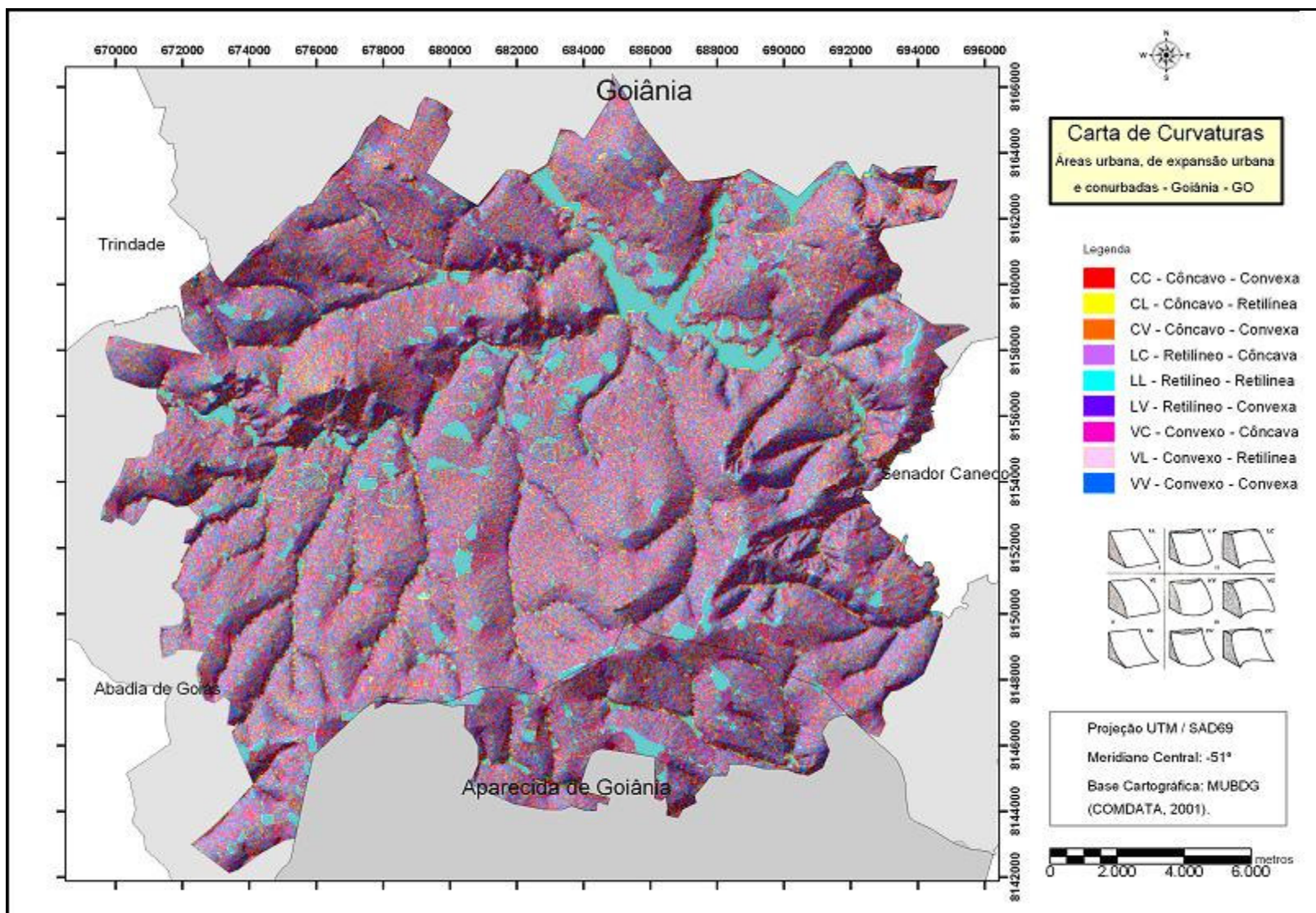


Figura 5.19. Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 25x25 m.

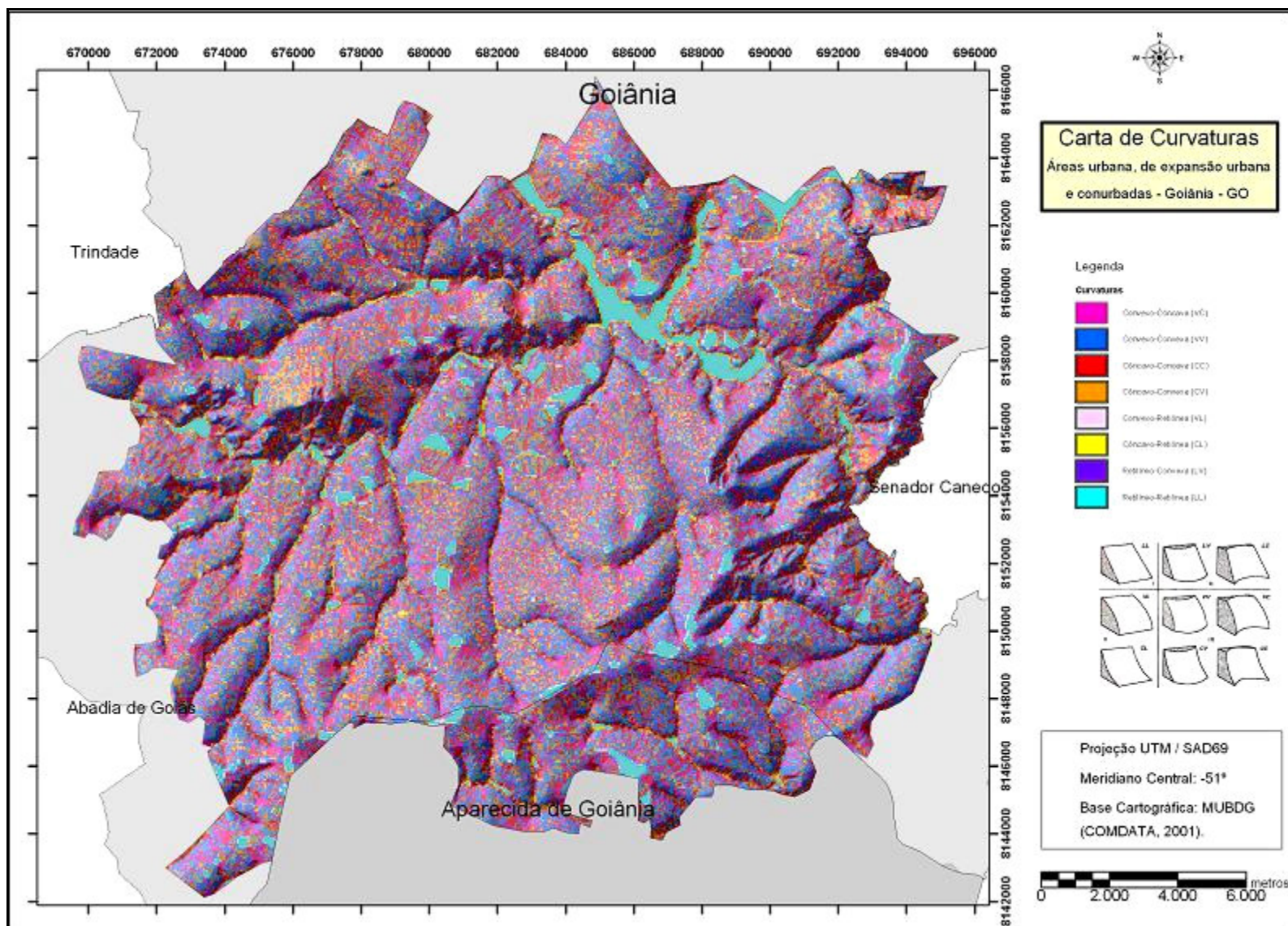


Figura 5.20. Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 50x50 m.

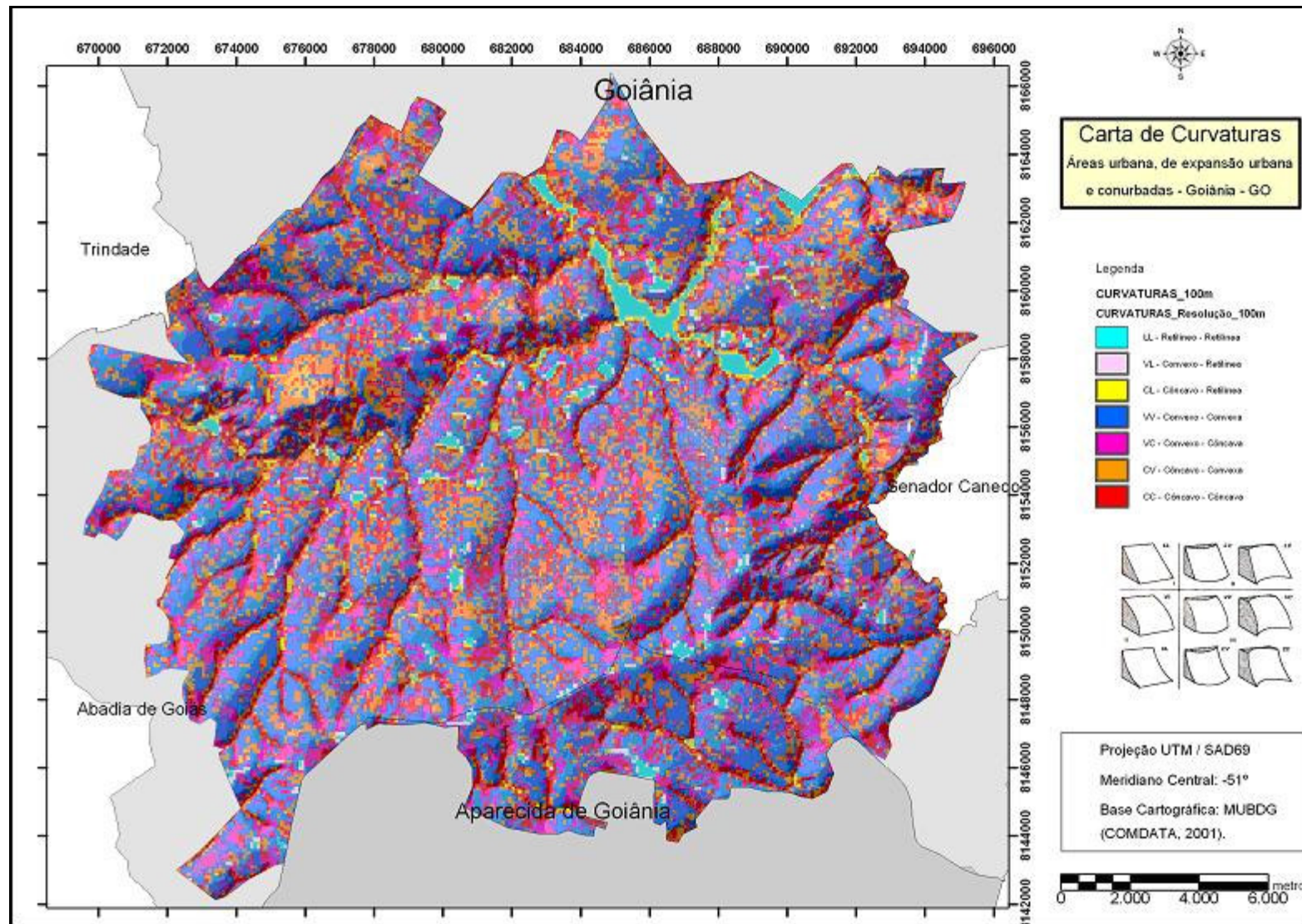


Figura 5.21. Carta de curvaturas das vertentes de Goiânia, resolução espacial de 100x100 m.

Wood (1996) também descreve uma relação de variação no padrão de representação da curvatura com a entropia do relevo de determinado local, em que quanto maior a entropia, as feições de curvatura são mais destacadas, o que é explicado pelo efeito da vizinhança. Essa análise é de fato comprovada a partir da observação dos produtos gerados na presente pesquisa. A variação dos valores de entropia da área de estudos é apresentada no próximo item.

Ainda, para o entendimento do padrão de variação dos valores de curvaturas do perfil e planas, de acordo com a sua resolução espacial, são apresentados da Fig.5.22 até a Fig. 5.26 os histogramas representando a frequência das células de cada carta em relação aos valores em porcentagem por metro. Desde a Fig.5.22 até a Fig. 5.24 observa-se que os valores próximos ao valor equivalente à curvatura retilínea (próximos a zero) são muito mais frequentes.

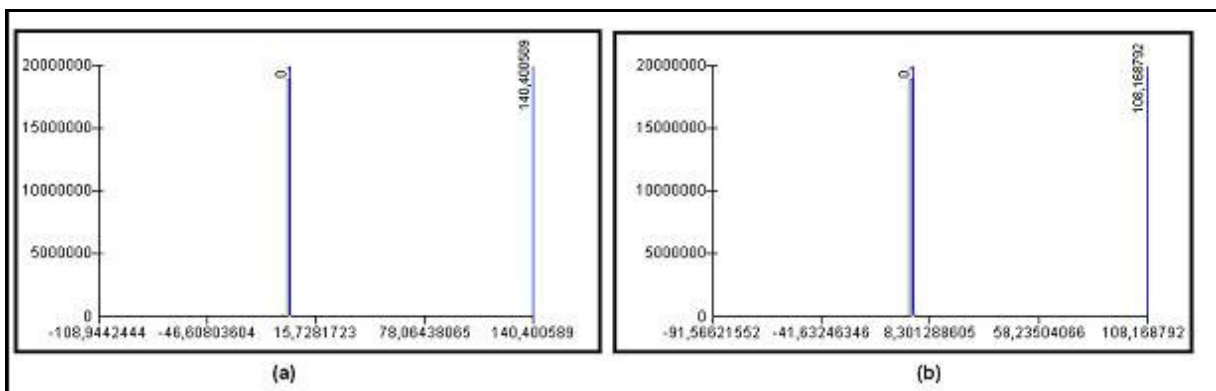


Fig.5.22. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura ($\%.m^{-1}$), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 5x5m.

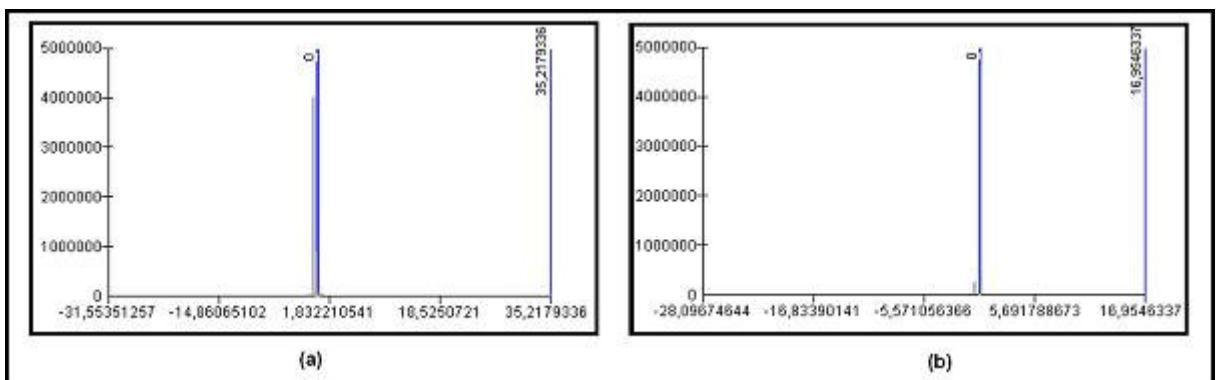


Fig.5.23. Histogramas relativos à distribuição das frequências de células, por valores de curvatura ($\%.m^{-1}$), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 10x10m.

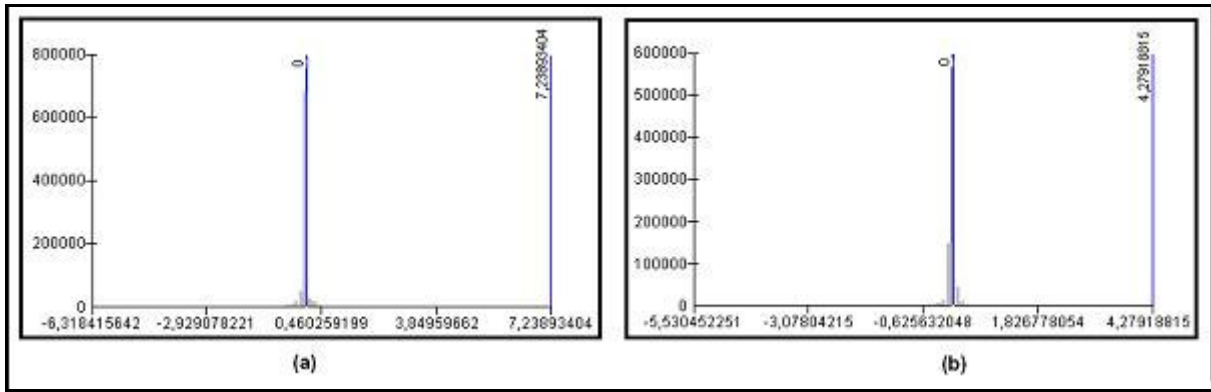


Fig.5.24. Histogramas relativos à distribuição das freqüências de células, por valores de curvatura ($\%.m^{-1}$), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 25x25m.

Da Fig.5.25, relativa à resolução de 50x50 m, até a Fig.5.27, observa-se progressivamente uma melhor distribuição dos valores relativos às curvaturas, tanto do perfil quanto planas. É importante notar que essa distribuição não é simétrica, como já descrito anteriormente.

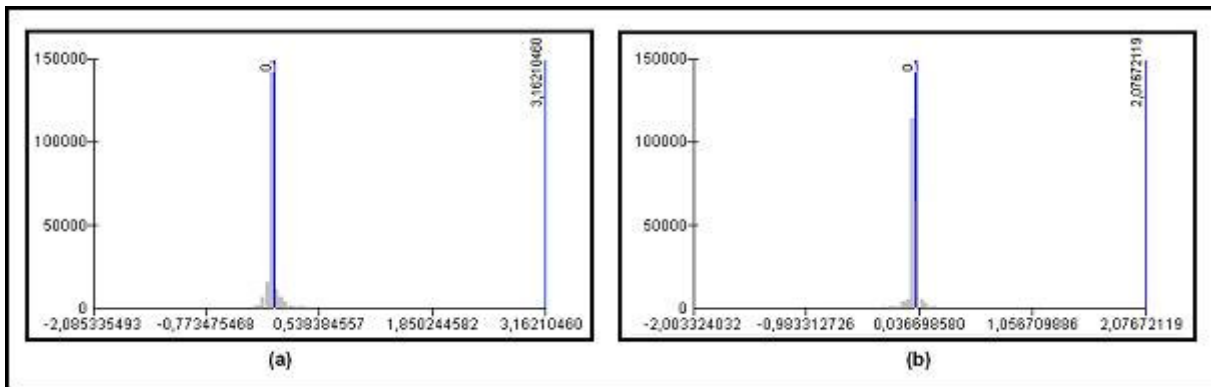


Fig.5.25. Histogramas relativos à distribuição das freqüências de células, por valores de curvatura ($\%.m^{-1}$), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 50x50m.

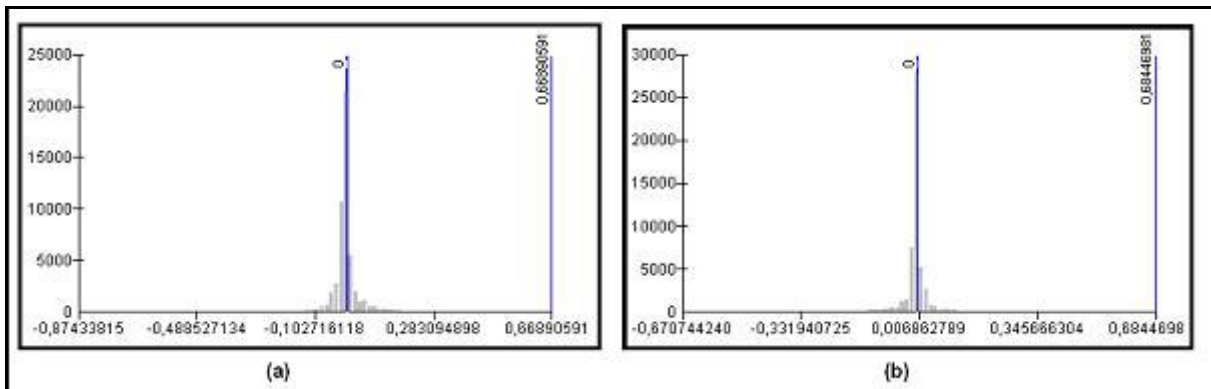


Fig.5.26. Histogramas relativos à distribuição das freqüências de células, por valores de curvatura ($\%.m^{-1}$), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 100x100m.

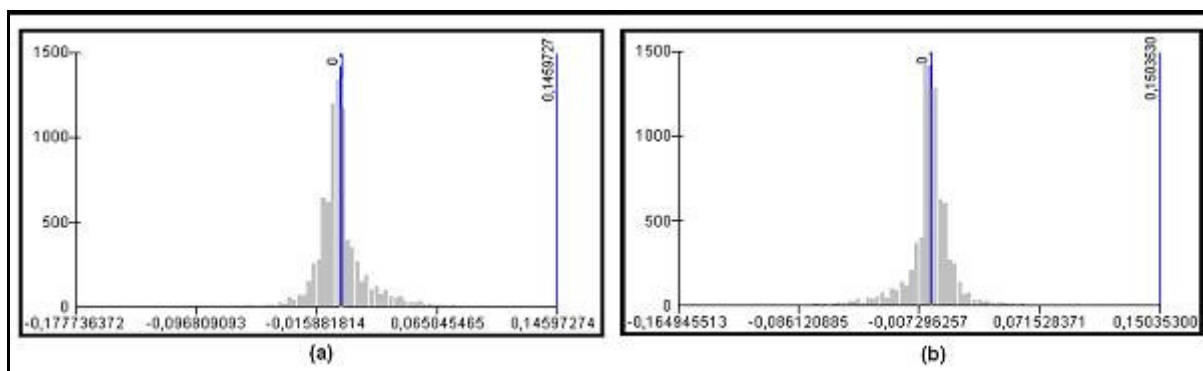


Fig.5.27. Histogramas relativos à distribuição das freqüências de células, por valores de curvatura (%.m⁻¹), das cartas de curvaturas do perfil (a) e planas (b), na resolução de 250x250m.

Os padrões de curvaturas do perfil e plana, relacionados aos atributos do meio físico, geologia, geomorfologia e solos da área de estudos foram analisados a partir da Tab. 5.1. As tabelas foram apresentadas na seqüência em que a primeira contém a relação em área (km²), a segunda em porcentagem do primeiro atributo em relação ao segundo e a terceira tabela apresenta a relação do segundo atributo em relação ao primeiro.

A relação da curvatura do perfil com as litologias existentes na área de estudos (Tab. 5.1, Tab. 5.2 e Tab. 5.3) pode ser observada da seguinte forma: na área onde ocorrem curvaturas do perfil côncavas, 56% correspondem aos xistos; onde ocorrem curvaturas do perfil retilíneas, 40% correspondem às aluviões e onde ocorrem curvaturas do perfil convexas, 65% também correspondem aos xistos.

Tabela 5.1. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de geologia.

Geologia	Curvatura do Perfil				Somatório
	N.C.*	Côncava	Retilínea	Convexa	
N.C.*	6649,86	0,53	0,04	0,43	6650,86
aluvião	0,01	7,17	2,8	2,94	12,92
charnockitos	0,13	0,14	0	0,23	0,5
granulito anfibolito	1,08	45,65	1,69	63,21	111,63
granulitos bandados	0,04	12,03	0,14	13,08	25,29
granulitos paraderivados	0,37	2,82	0,05	1,96	5,2
quartzito micáceo	0,03	0,7	0	0,83	1,56
xisto	3,16	88,82	2,35	151,46	245,79
Somatório	6654,68	157,86	7,07	234,14	7053,75

*A classe N.C. equivale à área do mapa onde não existe correlação em área entre as duas cartas.

Tabela 5.2. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de geologia.

Geologia	Curvatura do Perfil				Somatório
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	
N.C.	99,93	0,34	0,57	0,18	101,01
aluvião	0,00	4,54	39,60	1,26	45,40
charnockitos	0,00	0,09	0,00	0,10	0,19
granulito anfibolito	0,02	28,92	23,90	27,00	79,83
granulitos bandados	0,00	7,62	1,98	5,59	15,19
granulitos paraderivados	0,01	1,79	0,71	0,84	3,34
quartzito micáceo	0,00	0,44	0,00	0,35	0,80
xisto	0,05	56,27	33,24	64,69	154,24
Somatório	100,00	100,00	100,00	100,00	400,00

Ao se considerar as litologias existentes na área em relação à curvatura do perfil (Tab. 5.3) é possível destacar que: 56 % da área onde ocorrem aluviões correspondem à curvatura do perfil côncava; 57% da área onde ocorrem rochas granulíticas anfibolíticas correspondem à curvatura do perfil convexa; 52% da área onde ocorrem rochas granulíticas bandadas referem-se à curvatura do perfil também convexa; 54% da área onde ocorrem rochas granulíticas paraderivadas correspondem à curvatura do perfil côncava; 61,62% da área onde ocorrem rochas xistosas são coincidentes com curvaturas do perfil convexas; 46% dos charnockitos correspondem às curvaturas do perfil convexas e 53% de onde ocorrem os quartzitos micáceos são coincidentes com curvaturas também convexas.

Tabela 5.3. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geologia e curvatura do perfil.

Geologia	Curvatura do Perfil				Somatório
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	
N.C.	99,98	0,01	0,00	0,01	100,00
aluvião	0,08	55,50	21,67	22,76	100,00
charnockitos	26,00	28,00	0,00	46,00	100,00
granulito anfibolito	0,97	40,89	1,51	56,62	100,00
granulitos bandados	0,16	47,57	0,55	51,72	100,00
granulitos paraderivados	7,12	54,23	0,96	37,69	100,00
quartzito micáceo	1,92	44,87	0,00	53,21	100,00
xisto	1,29	36,14	0,96	61,62	100,00
Somatório	137,51	307,20	25,66	329,63	800,00

No que se refere à geomorfologia, a relação das unidades com a curvatura do perfil (Tab. 5.4, Tab. 5.5 e Tab. 5.6) pode ser assim resumida: as unidades de Chapadões de Goiânia - A (CG_A), Chapadões de Goiânia - R (CG_R), Planalto Embutido de Goiânia - c1 (PEG_c1), Planalto Embutido de Goiânia - c2 (PEG_c2), Planalto Embutido de Goiânia - t (PEG_t) e Terraços fluviais (Tf) possuem metade ou mais da metade da área em porcentagem relacionada à curvatura do perfil convexa; as Planícies fluviais (Pf) apresentam 58% da área de ocorrência coincidente com a curvatura do perfil côncava e as unidades de Fundos de Vale (FV) e do Planalto Dissecado de Goiânia - a4 (PDG_a4) apresentam aproximadamente a metade de sua área de ocorrência tanto em relação à curvatura do perfil côncava quanto à convexa.

Tabela 5.4. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e geomorfologia.

Geomorfologia	Curvatura do Perfil				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	5959,35	0,09	0	0,07	5959,51
PDG_a4	0,01	4,84	0,01	5,23	10,09
CG_A	0,21	4,4	0,08	12,7	17,39
CG_R	0,05	4,94	0,18	9,15	14,32
PEG_c1	0,69	35,47	0,89	70,73	107,78
PEG_c2	0,42	26,91	0,52	46,41	74,26
PEG_t	0,01	9,47	0,75	13,7	23,93
Tf	0	1,41	0,24	1,67	3,32
Pf	0,01	7,43	2,78	2,63	12,85
FV	0,1	48,79	1,12	45,08	95,09
Somatório	5960,85	143,75	6,57	207,37	6318,54

Tabela 5.5. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geomorfologia e de curvatura do perfil (resolução de 100 m).

Geomorfologia	Curvatura do Perfil				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	0	0	100
PDG_a4	0	48	0	52	100
CG_A	1	25	0	73	100
CG_R	0	34	1	64	100
PEG_c1	1	33	1	66	100
PEG_c2	1	36	1	62	100
PEG_t	0	40	3	57	100
Tf	0	42	7	50	100
Pf	0	58	22	20	100
FV	0	51	1	47	100
Somatório	103	368	37	492	1000

Quanto às áreas das classes de curvatura do perfil em relação às unidades geomorfológicas predominantes em cada um (Tab. 5.6), é possível afirmar que as áreas com curvaturas do perfil côncavas são na maioria correspondentes aos fundos de vale, as áreas com curvaturas retilíneas, às planícies fluviais e as áreas com curvaturas convexas, ao Planalto Embutido de Goiânia - c1.

Tabela 5.6. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de geomorfologia.

Geomorfologia	Curvatura do Perfil				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	0	0	100
PDG_a4	0	3	0	3	6
CG_A	0	3	1	6	10
CG_R	0	3	3	4	11
PEG_c1	0	25	14	34	72
PEG_c2	0	19	8	22	49
PEG_t	0	7	11	7	25
Tf	0	1	4	1	5
Pf	0	5	42	1	49
FV	0	34	17	22	73
Somatório	100	100	100	100	400

Quanto à curvatura do perfil em relação aos solos (Tab. 5.7 e Tab. 5.8), tanto as curvaturas côncavas quanto as convexas tem a maior parte de sua área coincidentes com solos classificados como Latossolo Vermelho e a retilínea com solos do tipo Neossolo Flúvico e Gleissolo.

Tabela 5.7. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de solos (resolução de 100 m) e de curvatura do perfil.

Solos	Curvatura do Perfil				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	6655,05	0,00	0,00	0,00	6655,05
Cambissolo Háptico	3,02	8,46	0,06	10,87	22,41
Latossolo Vermelho	36,78	113,56	2,61	177,59	330,54
Latossolo Vermelho-Amarelo	1,10	2,04	0,08	5,60	8,82
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0,15	10,55	3,60	6,02	20,32
Neossolo Litólico	0,00	4,54	0,09	4,28	8,91
Nitossolo Vermelho	0,00	3,75	0,11	3,18	7,04
Plintossolo Pétrico	0,00	0,11	0,02	0,45	0,58
Somatório	6696,10	143,01	6,57	207,99	7053,67

Tabela 5.8. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura do perfil (resolução de 100 m) e de solos.

Solos	Curvatura do Perfil				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	99	0	0	0	99
Cambissolo Háptico	0	6	1	5	12
Latossolo Vermelho	1	79	40	85	205
Latossolo Vermelho-Amarelo	0	1	1	3	5
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0	7	55	3	65
Neossolo Litólico	0	3	1	2	7
Nitossolo Vermelho	0	3	2	2	6
Plintossolo Pétrico	0	0	0	0	1
Somatório	100	100	100	100	400

A quantidade de área das classes de solos do tipo Cambissolo Háptico, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Plintossolo Pétrico é maior para as curvaturas do perfil convexas, enquanto as áreas classificadas como Neossolo Litólico e Nitossolo Vermelho possuem áreas aproximadamente equivalentes relacionadas às curvaturas do perfil côncavas e convexas. As classes de solos Neossolo Flúvico e Gleissolo mostraram maior correlação em área com a curvatura côncava (Tab. 5.9).

Tabela 5.9. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de solos e de curvatura do perfil (resolução de 100 m).

Solos	Curvatura do Perfil				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	0	0	100
Cambissolo Háptico	13	38	0	49	100
Latossolo Vermelho	11	34	1	54	100
Latossolo Vermelho-Amarelo	12	23	1	63	100
Neossolo Flúvico e Gleissolo	1	52	18	30	100
Neossolo Litólico	0	51	1	48	100
Nitossolo Vermelho	0	53	2	45	100
Plintossolo Pétrico	0	19	3	78	100
Somatório	138	270	26	366	800

Em relação à carta de curvatura plana, quando analisadas em confronto com o mapa geológico por meio de tabulação cruzada (Tab. 5.10, Tab. 5.11, Tab. 5.12), as classes de curvaturas côncavas e convexas têm mais da metade de sua área coincidente às rochas xistosas e as curvaturas planas retilíneas apresentam 42% da sua área correspondente às rochas xistosas, 27% às aluviões e 25% aos granulitos anfibolitos. Quanto às áreas das classes do mapa geológico, as áreas de ocorrência de aluviões correspondem a todas as classes do

mapa de curvatura plana de forma equivalente; os charnockitos às curvaturas côncavas e convexas também de forma equivalente; as outras classes litológicas existentes na área de estudos relacionam-se em mais da metade à curvatura convexa.

Tabela 5.10. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de geologia e de curvatura plana (resolução de 100 m).

Geologia	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	6649,86	0,48	0,1	0,42	6650,86
Aluvião	0,01	3,92	4,42	4,57	12,92
Charnockitos	0,13	0,17	0	0,2	0,5
Granulito anfíbolito	1,08	39,18	3,97	67,4	111,63
Granulitos bandados	0,04	9,41	0,73	15,11	25,29
Granulitos paraderivados	0,37	2,09	0,11	2,63	5,2
Quartzito micáceo	0,03	0,52	0	1,01	1,56
Xisto	3,16	89,53	6,79	146,31	245,79
Somatório	6654,68	145,3	16,12	237,65	7053,75

Tabela 5.11. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geologia e de curvatura plana.

Geologia	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	0	0	100
Aluvião	0	30	34	35	100
Charnockitos	26	34	0	40	100
Granulito anfíbolito	1	35	4	60	100
Granulitos bandados	0	37	3	60	100
Granulitos paraderivados	7	40	2	51	100
Quartzito micáceo	2	33	0	65	100
Xisto	1	36	3	60	100
Somatório	138	247	46	370	800

Tabela 5.12. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura plana e de geologia.

Geologia	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	1	0	101
Aluvião	0	3	27	2	32
Charnockitos	0	0	0	0	0
Granulito anfíbolito	0	27	25	28	80
Granulitos bandados	0	6	5	6	17
Granulitos paraderivados	0	1	1	1	3
Quartzito micáceo	0	0	0	0	1
Xisto	0	62	42	62	165
Somatório	100	100	100	100	400

Quando as classes de curvatura plana são analisadas em relação à geomorfologia (Tab. 5.13, Tab. 5.14) é possível destacar que as curvaturas côncavas se relacionam mais à classe geomorfológica de Fundo de Vale, seguida pelas classes relativas aos Planaltos Embutidos (c1 e c2); a classe de curvatura retilínea às planícies fluviais e fundos de vale e a classe convexa ao Planalto Embutido de Goiânia - c1.

Tabela 5.13. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de geomorfologia e de curvatura plana (resolução de 100 m).

Geomorfologia	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	5959,35	0,07	0,02	0,07	5959,51
PDG_a4	0,1	3,67	0,03	6,29	10,09
CG_A	0,18	5,39	0,31	11,51	17,39
CG_R	0,05	4,86	0,53	8,88	14,32
PEG_c1	0,96	33,99	2,45	70,4	107,8
PEG_c2	0,43	23,7	1,29	48,84	74,26
PEG_t	0,01	8,2	1,75	13,97	23,93
Tf	0	1,2	0,48	1,64	3,32
Pf	0,01	4,34	4,2	4,3	12,85
FV	1,02	42,98	3,7	47,45	95,15
Somatório	5962,11	128,4	14,76	213,35	6318,62

Tabela 5.14. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura plana (resolução de 100 m) e de geomorfologia.

Geomorfologia	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	0	0	100
PDG_a4	0	3	0	3	6
CG_A	0	4	2	5	12
CG_R	0	4	4	4	12
PEG_c1	0	26	17	33	76
PEG_c2	0	18	9	23	50
PEG_t	0	6	12	7	25
Tf	0	1	3	1	5
Pf	0	3	28	2	34
FV	0	33	25	22	81
Somatório	100	100	100	100	400

Quanto às áreas das classes da carta de geomorfologia (Tab. 5.15), exceto as classes de Terraços Fluviais, Planícies Fluviais e Fundos de Vale tem mais da metade de sua área coincidente às curvaturas planas convexas.

Tabela 5.15. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geomorfologia e de curvatura plana (resolução de 100 m).

Geomorfologia	Curvatura Plana				Somatório
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	
N.C.	100	0	0	0	100
PDG_a4	1	36	0	62	100
CG_A	1	31	2	66	100
CG_R	0	34	4	62	100
PEG_c1	1	32	2	65	100
PEG_c2	1	32	2	66	100
PEG_t	0	34	7	58	100
Tf	0	36	14	49	100
Pf	0	34	33	33	100
FV	1	45	4	50	100
Somatório	105	314	68	513	1000

Em relação à tabulação cruzada entre as classes de solos e as de curvatura plana que ocorrem na área de estudos (Tab. 5.16 e Tab. 5.17), tanto as curvaturas côncavas quanto as convexas têm a maior parte de sua área correlacionada à classe Latossolo Vermelho, e a classe de curvatura plana retilínea tem mais da metade de sua parte coincidente também à classe Latossolo Vermelho.

Tabela 5.16. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de solos e de curvatura plana (resolução de 100 m).

Solos	Curvatura Plana				Somatório
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	
N.C.	6651,07	1,86	0,11	2,01	6655,05
Cambissolo Háplico	0,07	9,44	0,38	12,56	22,45
Latossolo Vermelho	1,69	117,78	8,98	202,11	330,56
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,02	3,47	0,29	5,05	8,83
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0,02	6,83	5,90	7,58	20,33
Neossolo Litólico	0,00	3,36	0,17	5,38	8,91
Nitossolo Vermelho	0,00	2,98	0,23	3,83	7,04
Plintossolo Pétrico	0,00	0,23	0,13	0,22	0,58
Somatório	6652,87	145,95	16,19	238,74	7053,75

Quando as áreas de ocorrência das classes de solo são analisadas comparativamente às classes de curvatura plana (Tab. 5.18), exceto para as classes Neossolo Flúvico e Gleissolo e Plintossolo Pétrico, as outras classes de solo têm mais da metade da área correlacionada à curvatura plana convexa.

Tabela 5.17. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de curvatura plana (resolução de 100 m) e de solos.

Solos	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	1	1	1	103
Cambissolo Háptico	0	6	2	5	14
Latossolo Vermelho	0	81	55	85	221
Latossolo Vermelho-Amarelo	0	2	2	2	6
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0	5	36	3	44
Neossolo Litólico	0	2	1	2	6
Nitossolo Vermelho	0	2	1	2	5
Plintossolo Pétrico	0	0	1	0	1
Somatório	100	100	100	100	400

Tabela 5.18. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de solos e de curvatura plana (resolução de 100 m).

Solos	Curvatura Plana				
	N.C.	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
N.C.	100	0	0	0	100
Cambissolo Háptico	0	42	2	56	100
Latossolo Vermelho	1	36	3	61	100
Latossolo Vermelho-Amarelo	0	39	3	57	100
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0	34	29	37	100
Neossolo Litólico	0	38	2	60	100
Nitossolo Vermelho	0	42	3	54	100
Plintossolo Pétrico	0	40	22	38	100
Somatório	101	270	64	364	800

5.4. CARTA DE ENTROPIA DO RELEVO

A partir dos conceitos apresentados no item 3.4 sobre a entropia da paisagem, o cálculo da entropia do relevo da área foi realizado com o auxílio de uma linguagem de programação disponível no SPRING/INPE, denominada LEGAL. Para cada célula de um novo modelo numérico do terreno, a entropia S foi calculada de acordo com uma vizinhança definida pelo tamanho da matriz de convolução (Fig. 5.28).

O cálculo da entropia S de cada célula da matriz referente à área de estudos foi realizado utilizando-se a formulação descrita no Cap. 3, por meio de uma matriz de convolução de tamanho $k \times k$ células, nessa matriz de altitudes da área de estudos de m linhas e n colunas, cuja formulação adaptada é apresentada na Eq.5.12.

$$S_{i,j} = \sum_{n=mín}^{máx} f_{z_n} \lg f_{z_n} \quad (5.12)$$

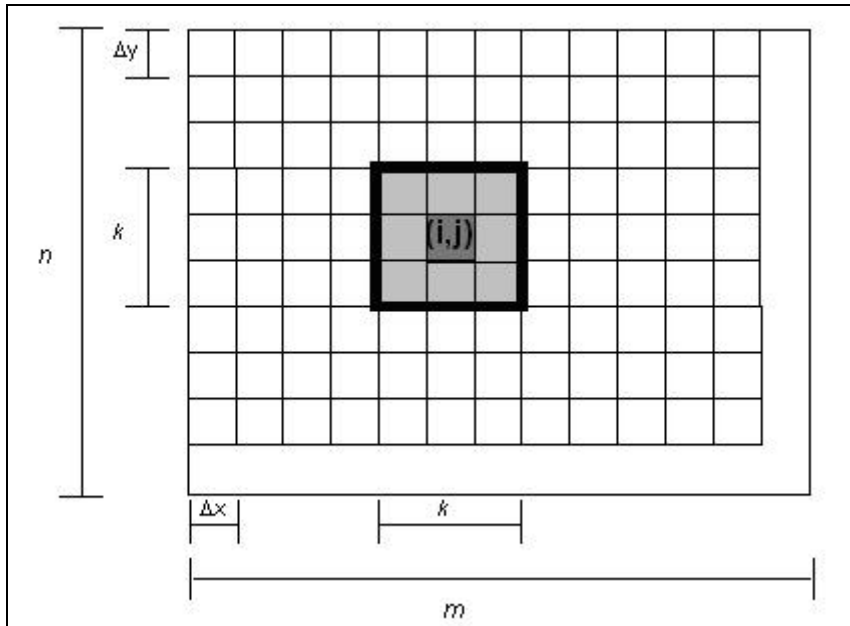


Figura 5.28. Configuração da matriz de convolução de $k \times k$ elementos, e da matriz $m \times n$ referente à área de estudos.

A posição de análise encontra-se no centro (i, j) da matriz de convolução ($1 < i < m$ e $1 < j < n$). Para o cálculo da entropia (S) é necessária inicialmente a definição dessa posição de análise (i, j) ao longo da matriz $(m \times n)$, variando nos eixos x e y . Em torno dessa posição de análise foram calculados valores da fórmula de S_{ij} na matriz $k \times k$, por meio da programação em LEGAL. A frequência de altitudes z_n foi calculada aplicando-se um contador para os valores existentes entre o $z_{\text{mín}}$ e o $z_{\text{máx}}$ a cada 5 m de intervalo entre as classes. Foi realizado então o cálculo da frequência em torno do ponto (x, y) , dos valores de altitude z_n . As variáveis na análise da entropia constituíram da resolução do *pixel* (célula) da matriz $(m \times n)$, Δx e Δy ; e do tamanho da matriz de convolução $(k \times k)$. Os testes para determinação do tamanho da matriz de convolução que tornariam possível o cálculo da entropia se iniciaram a partir de matrizes de 3×3 células, 9×9 células, até o tamanho de 20×20 células. Inicialmente, o tamanho dos interflúvios presentes na área, que mediam entre 100 m e 3 km, consistiu no valor segundo o qual se variou o tamanho da matriz de convolução. O tamanho de cada célula (resolução do *pixel*) da matriz de altitudes variou do valor de 5 m a 50 m. O intervalo das classes no histograma foi mantido constante em 5 m. A matriz de altitudes foi analisada em um retângulo da área de pesquisa, abrangendo a maior parte possível, com a finalidade de constatação da coerência dos resultados obtidos em uma área com limites regulares.

As menores matrizes de convolução, com menores resoluções geraram cartas de entropia com classes delimitadas quase equivalentes às da carta de declividade. A obtenção de

um resultado que representou uma superfície contínua determinou o que seria um considerado um resultado satisfatório. Até então, os cálculos geraram muitas discontinuidades, as quais seguiam a conformação das curvas de nível, exceto para o tamanho da matriz de convolução de 20 x 20 células, com a resolução do pixel da matriz de altitudes de 50 m.

A carta de entropia do relevo foi assim gerada para uma área retangular (Fig. 5.29). Os valores encontrados não são comparados em termos absolutos aos calculados por Zdenkovic & Scheidegger (1989) por não estarem normalizados.

Os valores calculados para a geração da carta de entropia são relativos à frequência de iguais valores em torno da matriz de convolução, dependendo portanto do tamanho dessa matriz, sendo proporcionais ao somatório do logaritmo das frequências. É possível também destacar que a elaboração dessa carta possibilitou a delimitação de compartimentos com resolução espacial de 50 m (tamanho das células da matriz, 50 x 50 m). E que esses compartimentos separam áreas mais planas (maior entropia) de áreas mais dissecadas (menor entropia), definindo também regiões de meia encosta. São informações que permitem a análise de domínios altimétricos de determinadas frequências de altitudes, relacionada à denominada textura do relevo e à amplitude do relevo. A delimitação de regiões homogêneas, levando em conta essa carta, pode ser relacionada à delimitação de padrões de terreno segundo a metodologia PUCE (Grant, 1975, Grant & Finlayson, 1978), descrita no Cap. 2.

A partir do produto cartográfico elaborado segundo a teoria da entropia da paisagem podem-se inferir as regiões que possuem uma tendência maior ao aplainamento, ou um maior potencial à perda de solo, levando em conta não somente a sua inclinação, mas a sua vizinhança. Portanto, a elaboração da carta de entropia do relevo permitiu a definição de compartimentos classificados quanto à dissecação do terreno, tendo em vista a delimitação de regiões homogêneas quanto à amplitude altimétrica da vizinhança considerada (medida vertical) e a largura dos interflúvios (medida horizontal). As classes da carta de entropia do relevo foram definidas de acordo com a distribuição de suas frequências no histograma (Fig. 5. 30).

A carta de entropia do relevo apresentou uma distribuição em que as maiores porcentagens em área das classes corresponderam à classe moderada, a menor ocorrência de classes consistiu nas entropias mais baixas (Tab.5.19), na área de estudos, para o recorte efetuado.

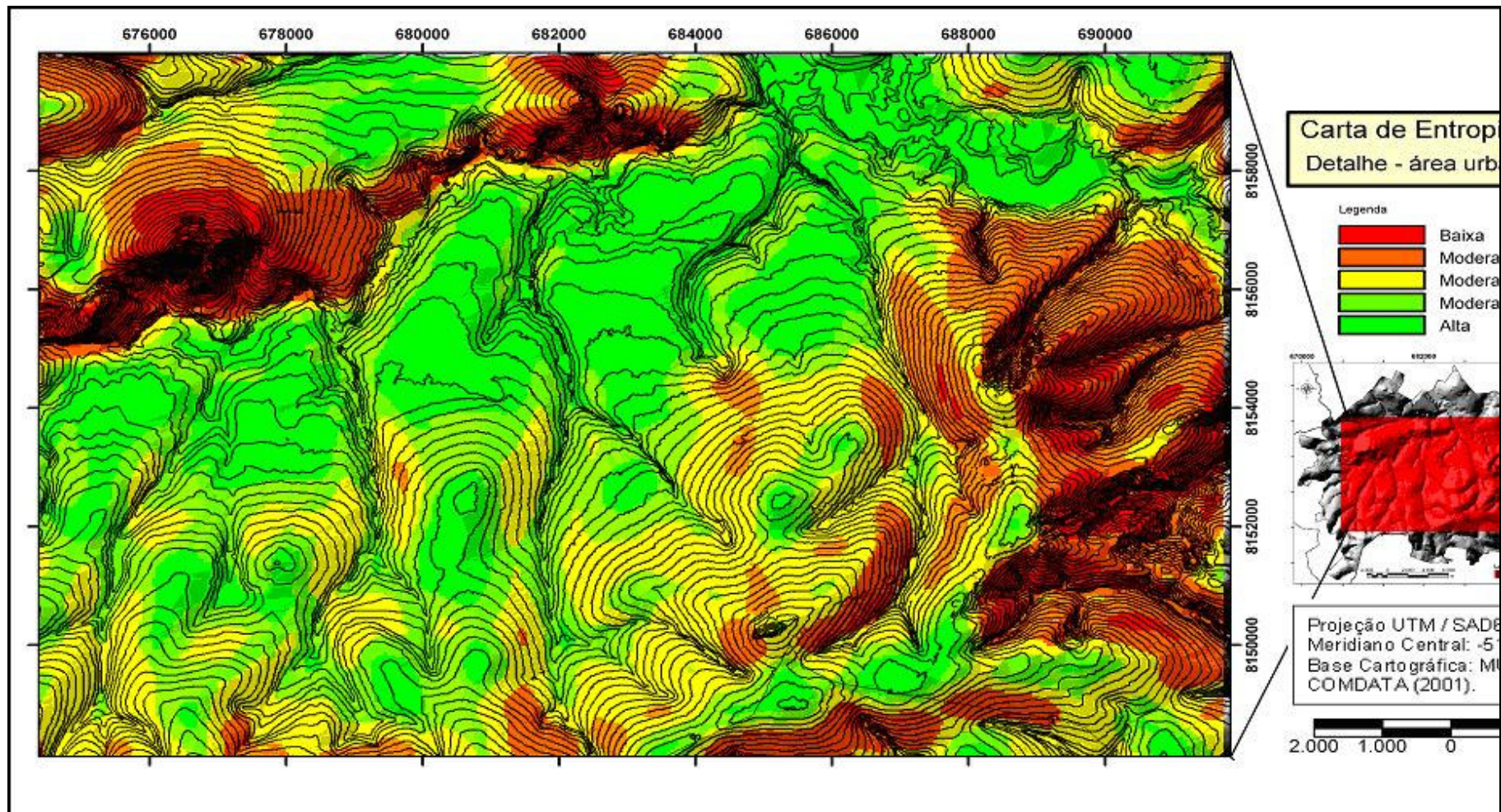


Figura 5.29. Carta de entropia do relevo, compartimentada segundo a distribuição das classes no histograma de freqüências.

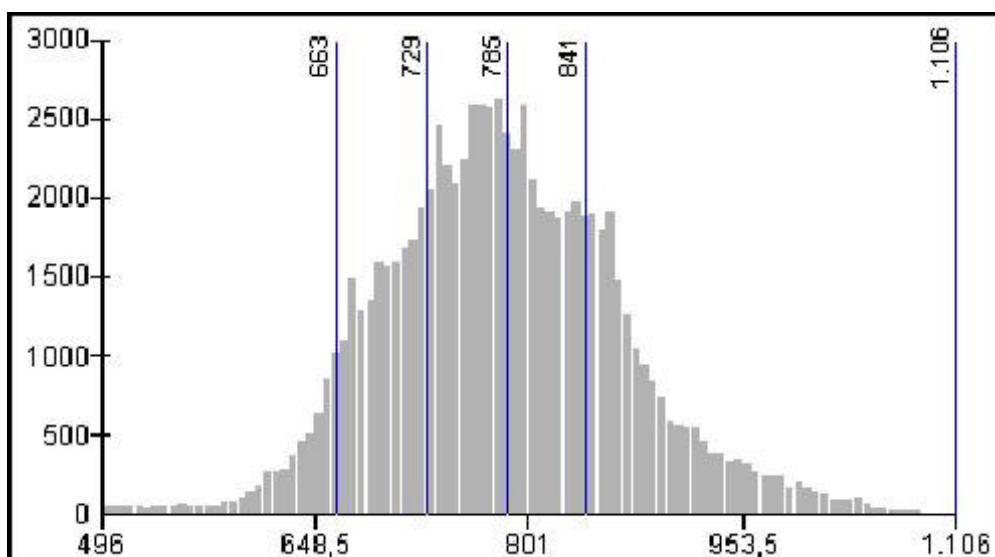


Figura 5.30. Histograma das classes da carta de entropia do relevo, resolução espacial de 50m.

Tabela 5.19. Área das classes da carta de entropia.

Classes Entropia do Relevo	%	Área (km ²)
496-663 (Baixa)	6,3	12,9
663-729 (Moderada à baixa)	19,9	40,8
729-786 (Moderada)	27,2	55,8
786-840 (Moderada à alta)	22,5	46,1
840-1106 (Alta)	24,2	49,8

A relação entre a carta de entropia do relevo e a carta de declividades é apresentada na Tab. 5.20 e na Tab. 5.21. A carta de declividades também é apresentada na Fig. 5.31, segundo o recorte da carta de entropia. Existe uma tendência de que os menores valores de entropia relacionem-se a maiores valores de gradiente (declividade), e vice versa. Entretanto, a relação não é diretamente proporcional, pois ao se observar as duas cartas, percebe-se que a delimitação das classes de cada uma é diferenciada, ou seja, não são totalmente correspondentes porque o cálculo da entropia levou em conta uma vizinhança muito maior que o tamanho da matriz de convolução utilizada no cálculo do gradiente (declividade) de cada célula da área (matriz de convolução de 3 x 3 células). A correlação maior entre as duas cartas ocorre nas regiões com maiores valores de entropia e menores valores de declividade (áreas planas).

A relação entre a carta de entropia gerada e os atributos do meio físico é representada a partir da Tab. 5.22, por meio de tabulação cruzada.

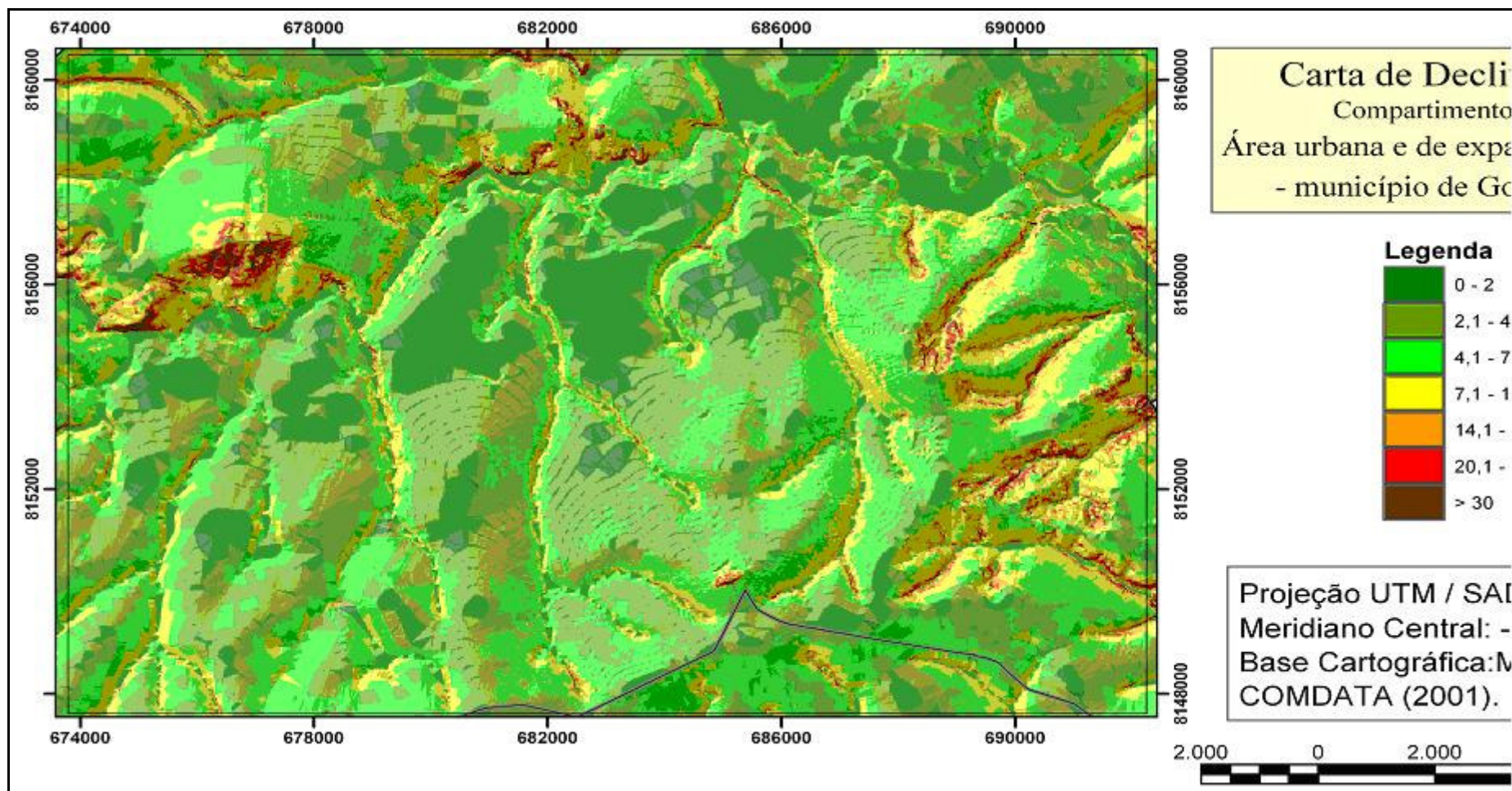


Figura 5.31. Carta de declividades, compartimentos, área urbana e de expansão do município de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia, recorte segundo o retângulo localizado na Fig. 5.29.

Tabela 5.20. Tabulação cruzada (%) entre as cartas de entropia e de declividade (a classe N.C. equivale à área não classificada na carta de entropia do relevo).

	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	> 30%	Somatório
496-663	3,4	0,8	19,6	44,8	17,8	9,1	4,6	100
663-729	4,9	5,4	51,7	28,9	5,9	2,6	0,7	100
729-785	8,2	35,4	40,1	14,1	1,6	0,5	0,1	100
785-841	16,1	47,6	25,4	9,7	0,9	0,3	0,1	100
841-918	47,5	32,0	13,8	5,7	0,7	0,3	0,1	100
918-1106	86,4	6,3	6,0	1,2	0,0	0,0	0,0	100
N.C.	14,1	26,1	35,4	18,7	3,3	1,8	0,6	100

Tabela 5.21. Tabulação cruzada (%) entre as cartas de declividade e de entropia (a classe N.C. equivale à área não classificada na carta de entropia do relevo).

	N.C.	496-663	663-729	729-785	785-841	841-918	918-1106	Somatório
0-2%	9,5	0,9	4,3	9,5	16,3	36,6	22,9	100
2,1-4%	12,7	0,2	3,3	29,8	34,9	17,9	1,2	100
4,1-7%	15,1	3,4	28,2	29,4	16,2	6,7	1,0	100
7,1-14%	15,7	15,2	30,9	20,2	12,2	5,5	0,4	100
14,1-20%	14,3	31,4	33,0	12,0	5,7	3,5	0,1	100
20,1-30%	17,4	35,7	31,9	7,6	4,3	3,1	0,0	100
> 30%	16,4	49,3	23,7	5,4	2,1	3,1	0,0	100

Tabela 5.22. Tabulação cruzada (em km²) entre as cartas de entropia do relevo e de geologia.

Geologia	Entropia do relevo							Somatório
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta		
Aluvião	0,98	0,00	0,05	0,50	0,81	4,70	7,04	
Granulito anfibolito	11,72	1,38	8,10	9,55	7,02	9,81	47,57	
Granulitos bandados	4,07	5,90	3,80	2,24	2,12	1,75	19,88	
Quartzito micáceo	0,12	0,16	0,41	0,33	0,02	0,00	1,03	
Xisto	17,38	5,47	28,43	43,15	36,15	33,50	164,06	
Somatório	34,26	12,90	40,79	55,76	46,12	49,75	239,58	

Da análise da relação entre as áreas das classes de entropia do relevo e as litológicas (Tab. 5.23 e Tab. 5.24), exceto para a classe de entropia baixa, que possui áreas em comum aproximadamente de forma equivalente com as rochas xistosas e com os granulitos bandados, as outras classes se correlacionam em área em mais da metade às rochas xistosas. Ao se observar as áreas das classes da carta de geologia em comparação à entropia do relevo pode ser destacada a maior relação de ocorrência das rochas granulíticas bandadas com a baixa entropia do relevo e aluviões com alta entropia.

Tabela 5.23. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de entropia do relevo e de geologia.

Geologia	Entropia do relevo						
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	Somatório
Aluvião	3	0	0	1	2	9	15
Granulito anfibolito	34	11	20	17	15	20	117
Granulitos bandados	12	46	9	4	5	4	79
Quartzito micáceo	0	1	1	1	0	0	3
Xisto	51	42	70	77	78	67	386
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

Tabela 5.24. Tabulação cruzada (em %) entre as cartas de geologia e de entropia do relevo.

Geologia	Entropia do relevo						
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	Somatório
Aluvião	14	0	1	7	11	67	100
Granulito anfibolito	25	3	17	20	15	21	100
Granulitos bandados	20	30	19	11	11	9	100
Quartzito micáceo	11	15	39	32	2	0	100
Xisto	11	3	17	26	22	20	100
Somatório	81	51	93	97	61	117	500

Da tabulação cruzada entre as classes de entropia do relevo com as de geomorfologia (Tab. 5.25 e Tab. 5.26) destaca-se a correlação da classe de entropia baixa com Fundos de Vale e com o Planalto Dissecado de Goiânia - a4.

Tabela 5.25. Tabulação cruzada (em km²) entre geomorfologia e entropia do relevo.

Geomorfologia	Entropia do relevo						
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	Somatório
N.C.	6692,94	0,00	2,12	1,93	0,92	0,57	6698,47
PDG_a4	4,88	4,30	0,69	0,25	0,04	0,00	10,16
CG_A	17,11	0,00	0,01	0,22	0,07	0,00	17,39
CG_R	7,37	0,00	0,08	1,11	2,52	3,22	14,29
PEG_c1	33,85	0,35	11,21	26,62	21,03	14,73	107,78
PEG_c2	46,13	3,45	13,57	7,92	2,50	0,79	74,35
PEG_t	1,28	0,00	0,00	1,75	4,84	16,13	24,00
Tf	2,01	0,00	0,00	0,11	0,26	1,08	3,46
Pf	6,34	0,00	0,32	1,36	0,95	3,80	12,78
FV	40,67	4,80	12,80	14,49	13,02	9,44	95,20
Somatório	6852,56	12,90	40,79	55,76	46,12	49,75	7057,88

E da tabulação entre as classes da carta de geomorfologia com as de entropia (Tab. 5.27) pode-se enumerar que possui maior porcentagem de áreas coincidentes: o Planalto Dissecado de Goiânia - a4 com a classe de baixa entropia; o Planalto Embutido de Goiânia - c1 com média entropia; Planalto Embutido de Goiânia - c2 com baixa à média entropia; e os

Chapadões de Goiânia - R, Planalto Embutido de Goiânia - t, Terraços fluviais e Planícies fluviais do rio Meia Ponte com alta entropia.

Tabela 5.26. Tabulação cruzada (em %) entre entropia do relevo e geomorfologia.

Geomorfologia	Entropia do relevo						
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	Somatório
N.C.	98	0	5	3	2	1	109
PDG_a4	0	33	2	0	0	0	36
CG_A	0	0	0	0	0	0	1
CG_R	0	0	0	2	5	6	14
PEG_c1	0	3	27	48	46	30	154
PEG_c2	1	27	33	14	5	2	82
PEG_t	0	0	0	3	10	32	46
Tf	0	0	0	0	1	2	3
Pf	0	0	1	2	2	8	13
FV	1	37	31	26	28	19	142
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

Tabela 5.27. Tabulação cruzada (em %) entre geomorfologia e entropia do relevo.

Geomorfologia	Entropia do relevo						
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	Somatório
N.C.	100	0	0	0	0	0	100
PDG_a4	48	42	7	2	0	0	100
CG_A	98	0	0	1	0	0	100
CG_R	52	0	1	8	18	23	100
PEG_c1	31	0	10	25	20	14	100
PEG_c2	62	5	18	11	3	1	100
PEG_t	5	0	0	7	20	67	100
Tf	58	0	0	3	7	31	100
Pf	50	0	3	11	7	30	100
FV	43	5	13	15	14	10	100
Somatório	547	52	52	83	90	175	1000

Quanto às classes de entropia em relação às classes de solo (Tab. 5.28, Tab. 5.29), exceto para a classe de entropia baixa, a maior porcentagem de área coincide com o Latossolo Vermelho.

Tabela 5.28. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de solos e de entropia do relevo.

Solos	Entropia do relevo						
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	Somatório
N.C.	2,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,49
Cambissolo Háptico	1,57	2,57	5,54	0,75	0,08	0,00	10,52
Latossolo Vermelho	26,03	6,09	33,89	52,87	43,59	42,87	205,34
Neossolo Flúvico e Gleissolo	2,73	0,00	0,13	1,58	2,16	6,64	13,24
Neossolo Litólico	1,44	3,02	0,86	0,54	0,29	0,24	6,39
Nitossolo Vermelho	0,00	1,22	0,37	0,02	0,00	0,00	1,61
Somatório	34,26	12,90	40,79	55,76	46,12	49,75	239,58

Tabela 5.29. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de entropia do relevo e de solos.

Solos	Entropia do relevo						Somatório
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	
N.C.	7	0	0	0	0	0	7
Cambissolo Háplico	5	20	14	1	0	0	40
Latossolo Vermelho	76	47	83	95	95	86	482
Neossolo Flúvico e Gleissolo	8	0	0	3	5	13	29
Neossolo Litólico	4	23	2	1	1	0	32
Nitossolo Vermelho	0	9	1	0	0	0	10
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

É possível destacar ainda, da observação da Tab. 5.30, que a área da classe Cambissolo Háplico tem mais da metade coincidente com a classe de entropia baixa; a metade da área dos solos do tipo Neossolo Flúvico e Gleissolo corresponde à entropia alta; as áreas das classes Neossolo Litólico e Nitossolo Vermelho apresentam a maior parte de sua área coincidentes com a entropia do relevo baixa.

Tabela 5.30. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de solos e de entropia do relevo.

Solos	Entropia do relevo						Somatório
	N.C.	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	
N.C.	100	0	0	0	0	0	100
Cambissolo Háplico	15	24	53	7	1	0	100
Latossolo Vermelho	13	3	17	26	21	21	100
Neossolo Flúvico e Gleissolo	21	0	1	12	16	50	100
Neossolo Litólico	22	47	14	8	5	4	100
Nitossolo Vermelho	0	76	23	1	0	0	100
Somatório	171	151	106	55	43	75	600

5.5. COMPARTIMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

Da observação dos produtos obtidos a partir da elaboração do MDE é possível a compartimentação da superfície do terreno quanto a sua morfologia. Os compartimentos morfológicos podem ser identificados, tendo em vista a sua homogeneidade quanto à forma, posição topográfica e índice de dissecação das vertentes, como afirmado no Cap.3. Tais compartimentos foram descritos nessa pesquisa para cada carta referente aos atributos morfométricos da área de estudos. As áreas homogêneas quanto à forma e posição topográfica das vertentes foram definidas a partir de cada célula da matriz (ponto geomorfométrico) referente ao atributo considerado. Nesse caso, a altitude (hipsometria) indicando a posição; o gradiente (declividade), a orientação e a curvatura plana e do perfil, indicando a forma das

vertentes. E a entropia do relevo, que leva em conta a vizinhança (objeto geomorfométrico), foi relacionada ao índice de dissecação das vertentes.

A divisão das classes de uma carta pode obedecer a critérios de agrupamento de valores previamente estabelecidos e/ou pode ser realizada segundo uma análise das discontinuidades existentes no histograma. A divisão em classes do gradiente (declividade) das vertentes, por exemplo, pode ser efetuada de acordo com diretrizes para a ocupação do solo urbano ou mesmo segundo a aptidão do terreno no que se refere à utilização agrícola, seguindo assim critérios preestabelecidos. O agrupamento de classes de gradiente, quando visa o estabelecimento de compartimentos homogêneos quanto à morfologia do terreno, pode ser realizado a partir da definição de discontinuidades ou pontos de inflexão na curva do histograma, que representa a frequência de ocorrência dos valores. A inflexão ou discontinuidade na curva de frequência separa assim regiões homogêneas quanto ao atributo considerado. O programa *ArcGIS* 8.2 possui diversas funções para o agrupamento de valores na geração de intervalos de classes. Dentre elas foi utilizada uma função que divide as classes com base nessa discontinuidade, denominada no programa de descontinuidade natural.

Assim, as cartas de declividade das vertentes e hipsométrica foram reclassificadas a partir da distribuição no histograma das respectivas frequências. Quanto às classes de curvaturas, essas foram delimitadas tomando-se a curvatura retilínea como o valor zero, separando as classes côncavas das convexas, se com valores negativos ou positivos, tanto para a curvatura do perfil quanto plana, segundo descrito no item 5.3. A carta de entropia do relevo classificada segundo a análise do seu histograma foi apresentada no item 5.4. Já o histograma referente à orientação das vertentes não apresentou discontinuidades pronunciadas na distribuição de frequências (Fig.5.32).

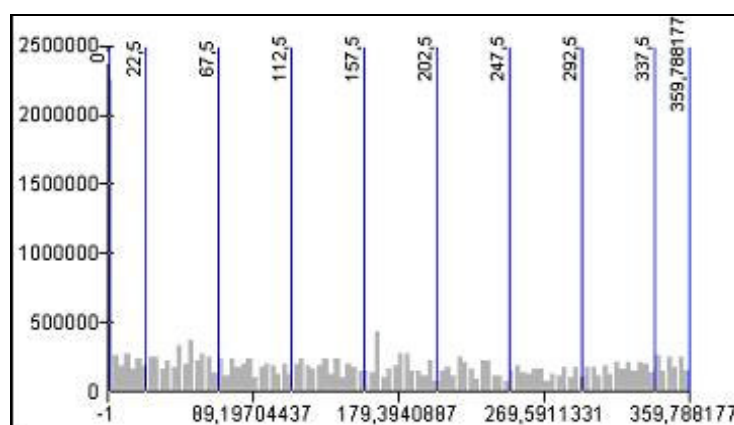


Figura 5.32. Histograma representando a distribuição das áreas das classes de orientação segundo a quantidade de células, na área da pesquisa.

Os valores dos gradientes das vertentes predominantes na área de estudos estão entre 2 e 7%, correspondendo a aproximadamente 60% da área (Tab. 5.31) caracterizando a área urbana e de expansão urbana de Goiânia como possuindo, em sua maior parte, vertentes planas a suave onduladas.

Tabela 5.31. Área das classes na carta de declividade reclassificada para a área urbana, de expansão urbana e conurbada com Aparecida de Goiânia.

Gradiente (%)	%	Área (km ²)
0-2	17,7	70,5
2-4	26,9	107,5
4-7	32,7	130,5
7-14	17,2	68,7
14-20	3,3	13
20-30	1,6	6,2
>30	0,6	2,5
Somatório	100	398,9

No histograma da Fig. 5.33 é possível destacar que as discontinuidades na inclinação da curva definem os compartimentos existentes, como entre 0 a 2, 2 a 4, 4 a 7 e 7 a 14%.

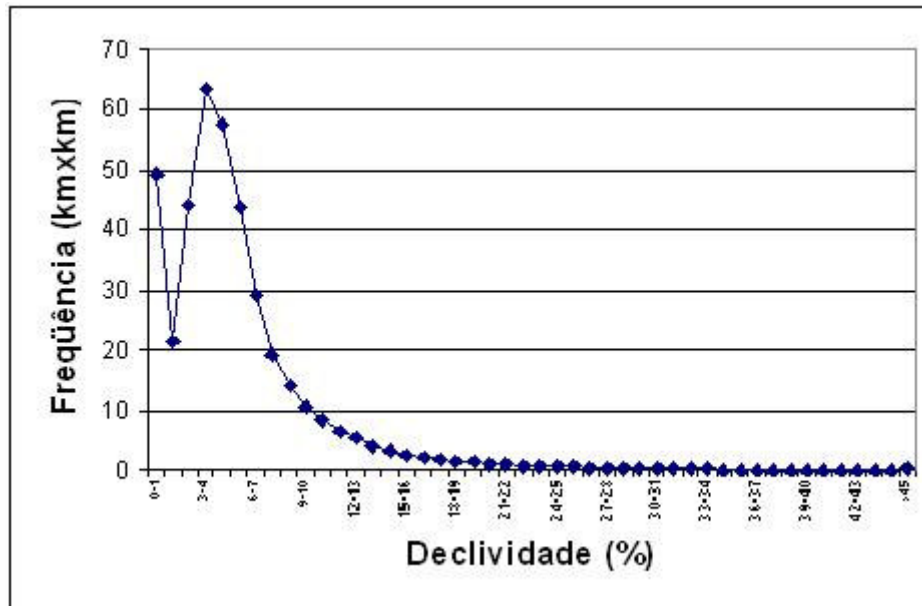


Figura 5.33. Histograma representando a distribuição das áreas das classes de declividade, áreas essas calculadas em km² na área da pesquisa.

As cartas relativas ao gradiente e à hipsometria, reclassificadas segundo a distribuição da frequência de cada valor respectivo, são apresentadas na Fig.5.34 e na Fig. 5.35.

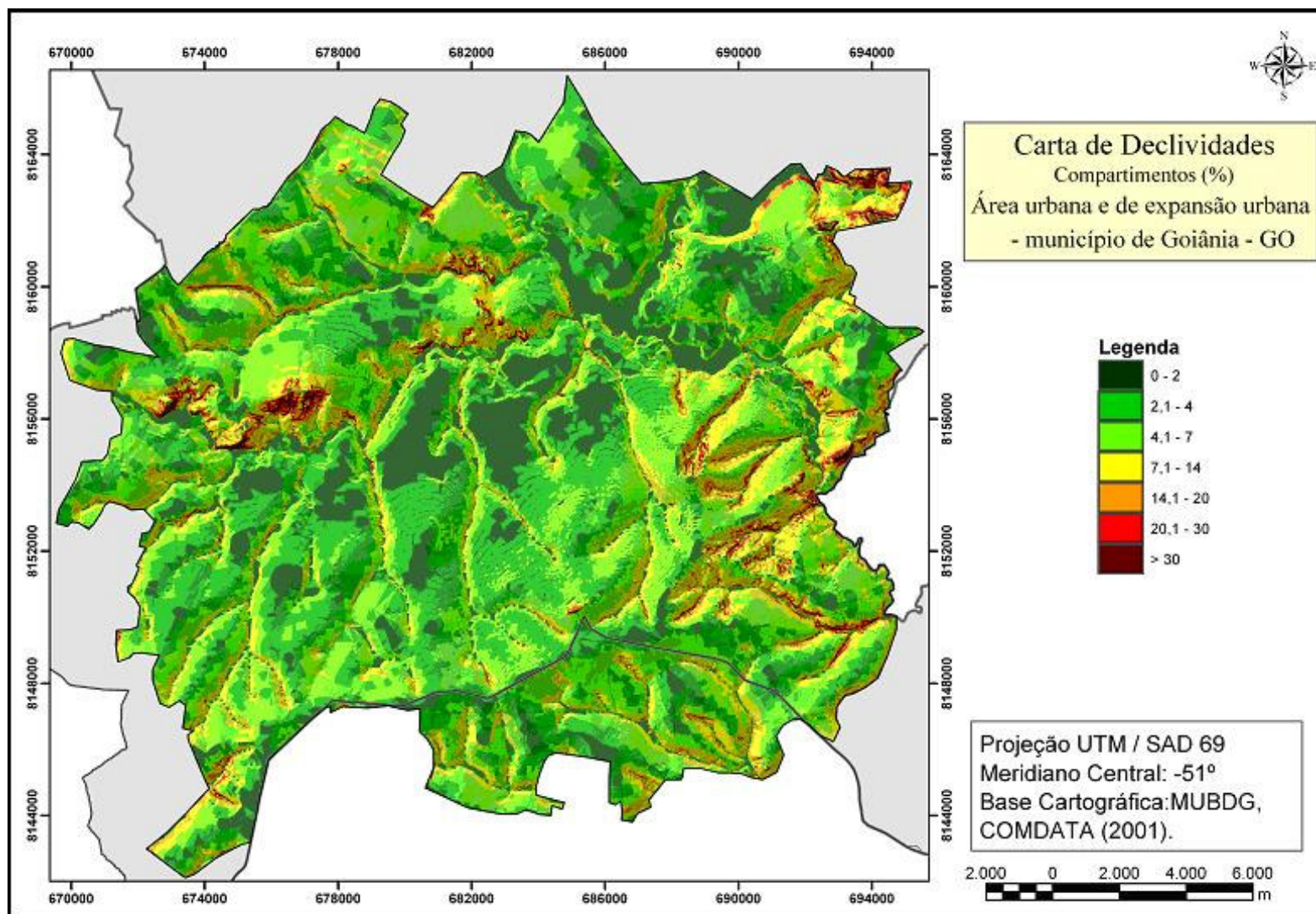


Figura 5.34. Carta de declividades, compartimentos, área urbana e de expansão do município de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia.

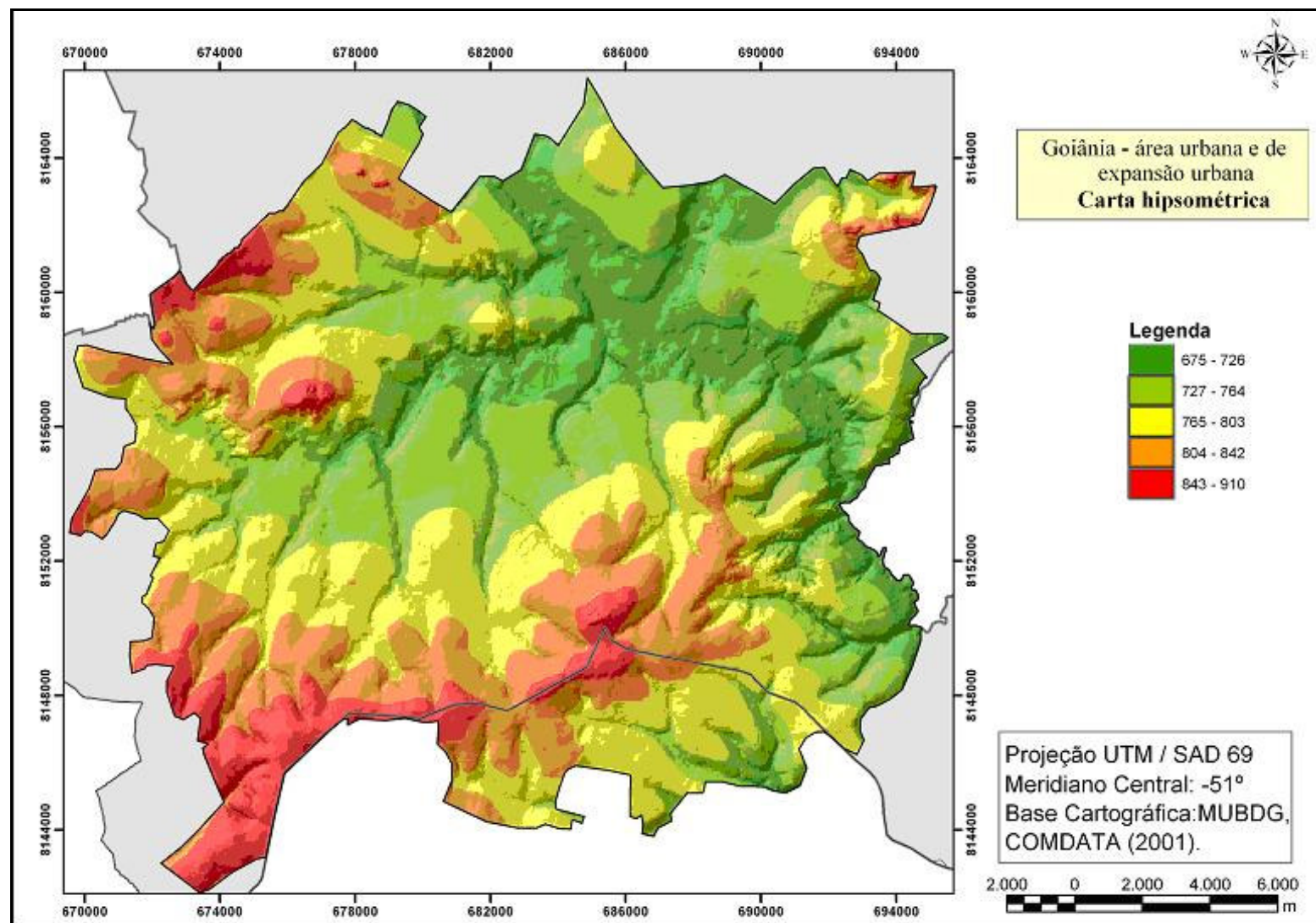


Figura 5.35. Carta hipsométrica, compartimentos, área urbana e de expansão do município de Goiânia, e da conurbação com Aparecida de Goiânia.

A ocorrência das classes em área mostra que as altitudes mais freqüentes estão entre 725 e 805 m (Tab. 5.32).

Tabela 5.32. Área das classes hipsométricas reclassificadas da área de estudos, para a área urbana, de expansão urbana e conurbada com Aparecida de Goiânia.

Classes hipsométricas (m)	%	Área (km ²)
675-725	16,2	64,5
725-765	28,6	113,7
765-805	28,8	114,6
805-840	17,9	71,3
840-910	8,5	33,7
Somatório	100	397,8

Da mesma forma, o histograma apresentado na Fig. 5.36 possibilita a separação em intervalos de classes de altitudes. As discontinuidades mais expressivas também foram definidas com auxílio da função existente no programa ArcGis 8.2, descrita anteriormente.

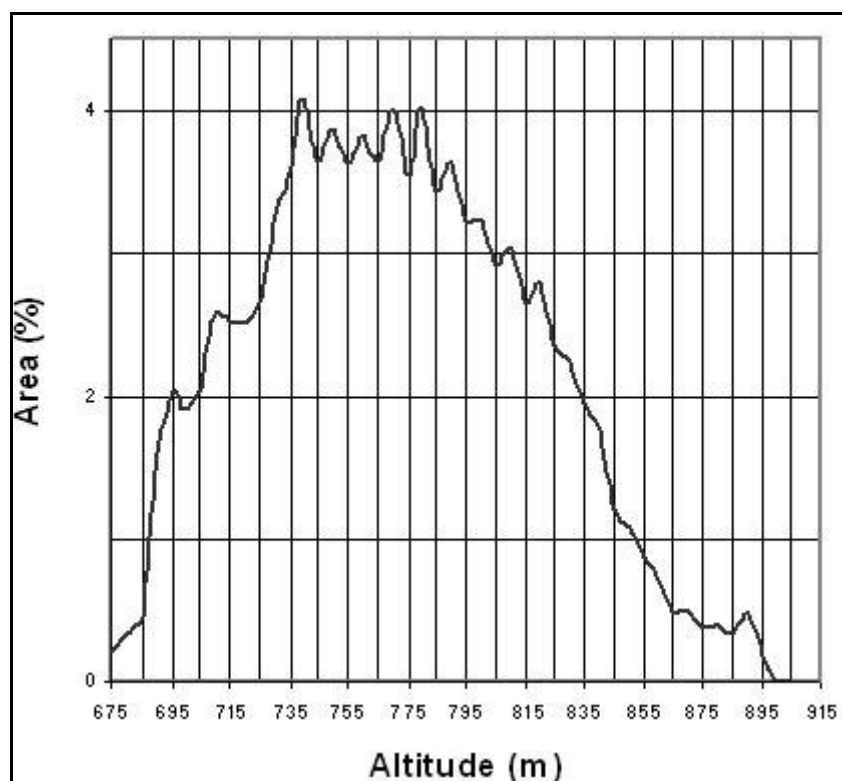


Figura 5.36. Histograma mostrando a distribuição da freqüência de altitudes da área de estudos.

Tabulações cruzadas efetuadas entre as cartas de declividade, hipsométrica e de orientação das vertentes e os atributos do meio físico, a partir da Tab. 5.33, mostram a coincidência em área das classes.

Da observação da Tab. 5.34 é possível destacar que mais da metade das classes de declividade, exceto para as classes com declividades maiores que 20%, estão relacionadas em área com as rochas xistosas. Em menor porcentagem, as classes com declividades de 0-20% relacionam-se aos granulitos anfibolitos e com declividades de >14% aos granulitos bandados.

Tabela 5.33. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de geologia e de declividade.

Geologia	Declividade								Somatório
	N.C.	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
N.C.	6654,72	0,06	0,06	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	6654,96
Aluvião	0,11	6,89	2,38	2,33	1,06	0,10	0,04	0,01	12,92
Charnockitos	0,06	0,03	0,00	0,01	0,09	0,14	0,10	0,07	0,50
Granulito anfibolito	1,34	18,45	32,91	40,57	15,46	2,06	0,64	0,21	111,63
Granulitos bandados	0,30	3,51	2,44	6,92	7,31	2,42	1,56	0,83	25,29
Granulitos paraderivados	0,27	0,48	0,12	0,78	1,76	0,69	0,68	0,43	5,20
Quartzito micáceo	0,02	0,13	0,07	0,45	0,43	0,18	0,18	0,10	1,56
Xisto	2,52	41,00	69,35	79,50	42,34	7,21	3,03	0,88	245,82
Somatório	6659,33	70,54	107,32	130,62	68,49	12,82	6,25	2,52	7057,88

Tabela 5.34. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de declividade e de geologia.

Geologia	Declividade								Somatório
	N.C.	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
N.C.	100	0	0	0	0	0	0	0	101
Aluvião	0	10	2	2	2	1	1	0	17
Charnockitos	0	0	0	0	0	1	2	3	6
Granulito anfibolito	0	26	31	31	23	16	10	8	145
Granulitos bandados	0	5	2	5	11	19	25	33	100
Granulitos paraderivados	0	1	0	1	3	5	11	17	37
Quartzito micáceo	0	0	0	0	1	1	3	4	9
Xisto	0	58	65	61	62	56	48	35	385
Somatório	100	100	100	100	100	100	100	100	800

Quando é analisada a relação entre as classes de geologia com as de declividade (Tab. 5.35), a maior parte das classes de aluviões correlaciona-se em área a declividades menores que 7%; de charnockitos, a maiores que 7%; de granulitos anfibolitos e xistos, a menores que 14%; de granulitos bandados, a menores que 20% e de granulitos paraderivados e quartzitos micáceos, a maiores que 4%.

Tabela 5.35. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de geologia e de declividade.

Geologia	Declividade								Somatório
	N.C.	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
N.C.	100	0	0	0	0	0	0	0	100
Aluvião	1	53	18	18	8	1	0	0	100
Charnockitos	12	6	0	2	18	29	21	13	100
Granulito anfibolito	1	17	29	36	14	2	1	0	100
Granulitos bandados	1	14	10	27	29	10	6	3	100
Granulitos paraderivados	5	9	2	15	34	13	13	8	100
Quartzito micáceo	1	8	4	29	27	12	12	6	100
Xisto	1	17	28	32	17	3	1	0	100
Somatório	123	124	93	160	147	68	53	32	800

A tabulação cruzada entre as áreas das classes de geomorfologia e de declividades das vertentes é apresentada na Tab. 5.36, na Tab. 5.37 e na Tab. 5.38. Pode-se observar que a relação entre as classes de declividade e de geomorfologia (Tab. 5.37) representa-se em área do seguinte modo: em declividades maiores que 7%, mais da metade das áreas são coincidentes com a classe de Fundos de Vale e as classes relativas a declividades entre 2 e 7% com o Planalto Embutido de Goiânia.

Tabela 5.36. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de geomorfologia e de declividade.

Geomorfologia	Declividade								Somatório
	N.C.	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
N.C.	6658,78	4,86	10,19	14,95	8,52	0,91	0,24	0,03	6698,47
PDG_a4	0,04	0,61	0,22	1,34	3,83	1,90	1,47	0,75	10,16
CG_A	0,07	2,56	7,77	5,68	1,17	0,12	0,02	0,02	17,39
CG_R	0,02	3,19	5,32	4,37	1,31	0,08	0,01	0,01	14,29
PEG_c1	0,05	16,57	47,79	35,92	6,89	0,40	0,14	0,04	107,78
PEG_c2	0,14	6,06	15,79	38,19	11,70	1,37	0,80	0,31	74,35
PEG_t	0,00	12,93	8,49	2,36	0,20	0,01	0,01	0,00	24,00
Tf	0,00	1,42	1,06	0,71	0,23	0,04	0,01	0,00	3,46
Pf	0,02	6,72	2,19	2,13	1,33	0,27	0,10	0,04	12,78
FV	0,23	15,63	8,50	24,99	33,32	7,73	3,47	1,33	95,20
Somatório	6659,34	70,55	107,30	130,62	68,49	12,82	6,25	2,52	7057,88

Quanto à relação entre as áreas das classes geomorfológicas com a declividade (Tab. 5.38), destaca-se a maior coincidência em porcentagem: o Planalto Dissecado de Goiânia - a4 com declividades maiores que 4%; os Chapadões de Goiânia (A e R) e o Planalto Embutido de Goiânia - c1 com declividades menores que 7%; o Planalto Embutido de Goiânia - c2 com declividades entre 2 e 14%; o Planalto Embutido de Goiânia - t e os Terraços fluviais com declividades menores que 7%; as Planícies fluviais com declividades menores que 7%,

destacando-se a maior relação com as declividades de 0 - 2% e os Fundos de Vale com declividades das vertentes menores que 14%, com destaque à relação com as declividades de 7 - 14%.

Tabela 5.37. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de declividade e de geomorfologia.

Geomorfologia	Declividade								Somatório
	N.C.	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
N.C.	100	7	9	11	12	7	4	1	152
PDG_a4	0	1	0	1	6	15	24	30	76
CG_A	0	4	7	4	2	1	0	1	19
CG_R	0	5	5	3	2	1	0	0	16
PEG_c1	0	23	45	27	10	3	2	1	112
PEG_c2	0	9	15	29	17	11	13	12	105
PEG_t	0	18	8	2	0	0	0	0	29
Tf	0	2	1	1	0	0	0	0	4
Pf	0	10	2	2	2	2	2	1	20
FV	0	22	8	19	49	60	56	53	267
Somatório	100	100	100	100	100	100	100	100	800

Tabela 5.38. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de geomorfologia e de declividade.

Geomorfologia	Declividade								Somatório
	N.C.	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
N.C.	99	0	0	0	0	0	0	0	100
PDG_a4	0	6	2	13	38	19	14	7	100
CG_A	0	15	45	33	7	1	0	0	100
CG_R	0	22	37	31	9	1	0	0	100
PEG_c1	0	15	44	33	6	0	0	0	100
PEG_c2	0	8	21	51	16	2	1	0	100
PEG_t	0	54	35	10	1	0	0	0	100
Tf	0	41	31	20	7	1	0	0	100
Pf	0	53	17	17	10	2	1	0	100
FV	0	16	9	26	35	8	4	1	100
Somatório	101	231	242	234	129	33	21	10	1000

A coincidência em área entre as classes de solos e de declividades é apresentada na Tab. 5.39, na Tab. 5.40 e na Tab. 5.41. Quanto ao resultado da tabulação cruzada em porcentagem de área, entre as classes de declividade e as de solos, as classes de declividades menores que 20% relacionam-se em mais da metade à classe de Latossolo Vermelho, enquanto as classes de declividade maior que 20% relacionam-se nessa ordem apresentada às classes de Latossolo Vermelho, Neossolo Litólico, Cambissolo Háplico e Nitossolo Vermelho.

Tabela 5.39. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de solos e de declividade.

Solos	Declividade							Somatório
	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
Cambissolo Háptico	2,34	0,70	4,60	9,66	3,11	1,55	0,44	22,39
Latossolo Vermelho	54,40	98,92	116,85	50,76	6,48	2,32	0,71	330,43
Latossolo Vermelho-Amarelo	2,00	2,65	2,81	1,14	0,25	0,05	0,01	8,90
Neossolo Flúvico e Gleissolo	9,59	4,25	4,05	1,94	0,35	0,14	0,07	20,38
Neossolo Litólico	0,89	0,52	1,32	2,58	1,58	1,29	0,77	8,94
Nitossolo Vermelho	1,10	0,25	0,81	2,30	1,05	0,91	0,53	6,94
Plintossolo Pétrico	0,22	0,02	0,20	0,13	0,00	0,00	0,00	0,57
Somatório	70,55	107,30	130,62	68,49	12,82	6,25	2,52	398,54

Tabela 5.40. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de declividade e de solos.

Solos	Declividade							Somatório
	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
Cambissolo Háptico	3	1	4	14	24	25	17	88
Latossolo Vermelho	77	92	89	74	51	37	28	449
Latossolo Vermelho-Amarelo	3	2	2	2	2	1	0	12
Neossolo Flúvico e Gleissolo	14	4	3	3	3	2	3	31
Neossolo Litólico	1	0	1	4	12	21	31	70
Nitossolo Vermelho	2	0	1	3	8	14	21	49
Plintossolo Pétrico	0	0	0	0	0	0	0	1
Somatório	100	100	100	100	100	100	100	700

Da relação entre as áreas das classes de solos e as de declividade, é possível resumir que as maiores coincidências são: a classe do Cambissolo Háptico com as declividades entre 4 e 20%; a do Latossolo Vermelho, do Latossolo Vermelho-Amarelo e do Plintossolo Pétrico, com declividades menores que 14%; a do Neossolo Flúvico e Gleissolo com declividades menores que 7%; a do Neossolo Litólico com declividades entre 4 e 30% e a do Nitossolo Vermelho com declividades entre 4 e 30%, com expressiva correlação com as declividades de 0 - 2%.

Tabela 5.41. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de solos e de declividade.

Solos	Declividade							Somatório
	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
Cambissolo Háptico	10	3	21	43	14	7	2	100
Latossolo Vermelho	16	30	35	15	2	1	0	100
Latossolo Vermelho-Amarelo	23	30	32	13	3	1	0	100
Neossolo Flúvico e Gleissolo	47	21	20	10	2	1	0	100
Neossolo Litólico	10	6	15	29	18	14	9	100
Nitossolo Vermelho	16	4	12	33	15	13	8	100
Plintossolo Pétrico	39	4	35	22	0	0	0	100
Somatório	161	97	168	165	54	37	19	700

A tabulação cruzadas entre as classes de intervalos de altitude e de geologia é apresentada na Tab.5.42, Tab. 5.43 e Tab. 5.44. Da Tab. 5.42 é possível destacar: aluviões estão presentes somente no intervalo das menores altitudes da área de estudos; os charnockitos em altitudes maiores que 800m; dentre os granulitos, os bandados e os paraderivados possuem altitudes coincidentes com valores maiores que 842m, enquanto os anfibolitos coincidem com valores menores e as áreas de maior coincidência para as rochas xistosas ocorrem no intervalo de 764 - 803m.

Tabela 5.42. Tabulação cruzada (em km²) entre as áreas das classes de geologia e altimétricas.

Geologia	Altitudes (m)						Somatório
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
N.C.	6658,7475	0,0725	0,0275	0,08	0,0475	0,105	6659,08
Aluvião	0,0425	12,8125	0	0	0	0	12,855
Charnockitos	0,005	0	0	0	0,2475	0,1775	0,43
Granulito anfibolito	0,24	23,4725	37,4425	28,37	19,3825	1,6525	110,56
Granulitos bandados	0,05	4,825	7,54	5,6	4,015	2,98	25,01
Gran. paraderivados	0,0625	0,4075	1,25	1,8475	1,0475	0,4275	5,0425
Quartzito micáceo	0,0025	0,185	0,55	0,355	0,0025	0,415	1,51
Xisto	0,215	25,63	61,67	76,9125	54,5575	24,4025	243,3875
Somatório	6659,365	67,405	108,48	113,165	79,3	30,16	7057,875

Tabela 5.43. Tabulação cruzada (em %) entre as áreas das classes de geologia e altimétricas.

Geologia	Altitudes (m)						Somatório
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
N.C.	100	0	0	0	0	0	100
Aluvião	0	100	0	0	0	0	100
Charnockitos	1	0	0	0	58	41	100
Granulito anfibolito	0	21	34	26	18	1	100
Granulitos bandados	0	19	30	22	16	12	100
Gran. paraderivados	1	8	25	37	21	8	100
Quartzito micáceo	0	12	36	24	0	27	100
Xisto	0	11	25	32	22	10	100
Somatório	103	171	151	140	134	101	800

Quanto à tabulação cruzada entre as classes altimétricas e geológicas, nas altitudes entre 726 e 842 m, mais da metade correlaciona-se em área às rochas xistosas e em menor quantidade às granulíticas anfibolíticas; para altitudes maiores que 842 m a maior parte também relaciona-se às rochas xistosas e ao intervalo de menores altitudes (675-726m), correlacionam-se em maior proporção, nessa ordem apresentada, as rochas xistosas, os granulitos anfibolitos e aluviões.

Tabela 5.44. Tabulação cruzada (em %) entre as áreas das classes altimétricas e de geologia.

Geologia	Altitudes (m)						Somatório
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
N.C.	100	0	0	0	0	0	101
Aluvião	0	19	0	0	0	0	19
Charnockitos	0	0	0	0	0	1	1
Granulito anfibolito	0	35	35	25	24	5	124
Granulitos bandados	0	7	7	5	5	10	34
Gran. paraderivados	0	1	1	2	1	1	6
Quartzito micáceo	0	0	1	0	0	1	2
Xisto	0	38	57	68	69	81	313
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

Em relação à tabulação cruzada entre as classes de intervalos de altitude e geomorfológicas (Tab. 5.45, Tab. 5.46) podem ser correlacionadas as seguintes áreas em porcentagem: as menores altitudes (675-726 m) a unidade de Fundos de Vale, altitudes entre 726 e 842 m ao Planalto Embutido de Goiânia e as maiores altitudes (842-910m) aos Chapadões de Goiânia - A e Planalto Embutido de Goiânia (c1 e c2).

Tabela 5.45. Tabulação cruzada (em km²) entre geomorfologia e altimetria.

Geomorfologia	Altitude (m)						Somatório
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
N.C.	6658,76	1,04	6,56	18,96	10,06	3,10	6698,47
PDG_a4	0,04	0,01	1,63	3,55	3,37	1,56	10,16
CG_A	0,08	0,00	0,00	2,08	7,27	7,97	17,39
CG_R	0,02	0,01	4,71	7,33	1,67	0,55	14,29
PEG_c1	0,07	9,71	34,07	32,05	22,53	9,35	107,78
PEG_c2	0,15	7,38	17,40	23,08	22,84	3,50	74,35
PEG_t	0,00	2,43	17,25	4,20	0,13	0,00	24,00
Tf	0,00	3,46	0,00	0,00	0,00	0,00	3,46
Pf	0,03	11,80	0,95	0,00	0,00	0,00	12,78
FV	0,23	31,56	25,91	21,92	11,44	4,14	95,20
Somatório	6659,37	67,41	108,48	113,17	79,30	30,16	7057,88

A Tab. 5.47 apresenta a tabulação entre as unidades geomorfológicas e os intervalos de altitude. Pode-se citar as seguintes correlações entre tais classes em porcentagem de área: a classe do Planalto Dissecado de Goiânia (a4) à altitudes maiores que 726m, predominando sua ocorrência no intervalo de 764-842 m; a classe dos Chapadões de Goiânia - superfície aplanainada (A), a altitudes maiores que 764 m; os Chapadões de Goiânia - superfície rampeada (R), a altitudes maiores que 726 m, predominando no intervalo de 726-803 m; as classes referentes às superfícies de formas convexas do Planalto Embutido de Goiânia (c1 e

c2) com maior coincidência entre 726 e 842 m e o Planalto Embutido de Goiânia - superfície de formas tabulares (t), com a maior ocorrência em altitudes entre 726 e 764 m; os Terraços fluviais somente em altitudes entre 675 e 726 m; as Planícies fluviais em altitudes menores que 764 m, principalmente no intervalo entre 675 e 726 m, e os Fundos de Vale ocorrendo em todas as altitudes presentes na área, predominando em área em altitudes menores que 803 m.

Tabela 5.46. Tabulação cruzada (em %) entre altimetria e geomorfologia.

Geomorfologia	Altitude (m)						
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	Somatório
N.C.	100	2	6	17	13	10	147
PDG_a4	0	0	2	3	4	5	14
CG_A	0	0	0	2	9	26	37
CG_R	0	0	4	6	2	2	15
PEG_c1	0	14	31	28	28	31	134
PEG_c2	0	11	16	20	29	12	88
PEG_t	0	4	16	4	0	0	23
Tf	0	5	0	0	0	0	5
Pf	0	18	1	0	0	0	18
FV	0	47	24	19	14	14	118
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

Tabela 5.47. Tabulação cruzada (em %) entre geomorfologia e altimetria.

Geomorfologia	Altitude (m)						
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	Somatório
N.C.	99	0	0	0	0	0	100
PDG_a4	0	0	16	35	33	15	100
CG_A	0	0	0	12	42	46	100
CG_R	0	0	33	51	12	4	100
PEG_c1	0	9	32	30	21	9	100
PEG_c2	0	10	23	31	31	5	100
PEG_t	0	10	72	17	1	0	100
Tf	0	100	0	0	0	0	100
Pf	0	92	7	0	0	0	100
FV	0	33	27	23	12	4	100
Somatório	101	255	211	200	151	83	1000

Da tabulação cruzada entre as classes de solos e de intervalos de altitude (Tab. 5.48 e Tab. 5.49) destacam-se as seguintes correlações em porcentagem de área (Tab. 5.49): o intervalo correspondente às menores altitudes (675-726 m) com os solos, em ordem decrescente de quantidade, do tipo Latossolo Vermelho, Neossolo Flúvico e Gleissolo e Cambissolo Háplico; de 726 a 842 m, também com Latossolo Vermelho e o intervalo

correspondente às maiores altitudes de igual modo com Latossolo Vermelho, além do Latossolo Vermelho Amarelo em menor quantidade.

Tabela 5.48. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de solos e de altimetria.

Solos	Altitude (m)						
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	Somatório
N.C.	6658,75	0,07	0,03	0,08	0,05	0,11	6659,08
Cambissolo Háplico	0,11	7,62	7,41	4,45	1,49	1,37	22,43
Latossolo Vermelho	0,34	39,23	95,61	103,73	72,84	18,83	330,57
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,03	0,00	0,00	0,23	0,87	7,75	8,88
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0,06	18,53	1,52	0,31	0,00	0,00	20,42
Neossolo Litólico	0,00	0,72	2,28	2,29	2,71	0,94	8,94
Nitossolo Vermelho	0,08	1,23	1,64	2,09	1,34	0,61	6,98
Plintossolo Pétrico	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,58
Somatório	6659,37	67,41	108,48	113,17	79,30	30,16	7057,88

Tabela 5.49. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de altimetria e de solos.

Solos	Altitude (m)						
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	Somatório
N.C.	100	0	0	0	0	0	101
Cambissolo Háplico	0	11	7	4	2	5	28
Latossolo Vermelho	0	58	88	92	92	62	392
Latossolo Vermelho-Amarelo	0	0	0	0	1	26	27
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0	27	1	0	0	0	29
Neossolo Litólico	0	1	2	2	3	3	12
Nitossolo Vermelho	0	2	2	2	2	2	9
Plintossolo Pétrico	0	0	0	0	0	2	2
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

A partir da observação da Tab. 5.50 é possível descrever as principais coincidências em porcentagem de área: Cambissolo Háplico com altitudes entre 675 e 803 m; Latossolo Vermelho e Nitossolo Vermelho com altitudes entre 675 e 842 m; Latossolo Vermelho Amarelo com altitudes maiores que 803 m, com predominância entre 842 e 910 m; Neossolo Flúvico e Gleissolo predominantemente em altitudes de 675 - 726 m; Neossolo Litólico entre 726 e 842 m e Plintossolo Pétrico coincidentes apenas com altitudes maiores que 842 m.

O atributo morfométrico, orientação das vertentes, na área de estudos apresenta um padrão de ocorrência, segundo descrito por meio do respectivo histograma, apresentado neste capítulo, sem descontinuidades expressivas, com áreas das classes (classes de vertentes voltadas para N, NE, E, SE, S, SW, W, NW e N) quase equivalentes entre si em quantidade. Por conseguinte, esse fato se reflete nas tabulações cruzadas entre o referido atributo e os atributos do meio físico, geologia, geomorfologia e solos (Tab. 5.50 à Tab. 5.59). Assim,

apresentam-se aqui as principais correlações não tão expressivas, mas que são passíveis de destaque.

Tabela 5.50. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de solos e de altimetria.

Solos	Altitude (m)							Somatório
	N.C.	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910		
N.C.	100	0	0	0	0	0	100	
Cambissolo Háplico	0	34	33	20	7	6	100	
Latossolo Vermelho	0	12	29	31	22	6	100	
Latossolo Vermelho-Amarelo	0	0	0	3	10	87	100	
Neossolo Flúvico e Gleissolo	0	91	7	2	0	0	100	
Neossolo Litólico	0	8	26	26	30	10	100	
Nitossolo Vermelho	1	18	23	30	19	9	100	
Plintossolo Pétrico	1	0	0	0	0	99	100	
Somatório	104	162	118	111	88	217	800	

Nas tabelas apresentadas relativas às tabulações cruzadas citadas acima, a classe referente às áreas não classificadas consiste também, e principalmente, às áreas planas, ou seja, sem orientação definida.

Em relação à geologia da área de estudos (Tab. 5.51 e Tab. 5.52), mais da metade da área de ocorrência, exceto para as vertentes voltadas para S e SW, coincidem com as rochas xistosas e, em quantidade menos expressiva, com os granulitos anfibolitos.

Tabela 5.51. Tabulação cruzada (em km²) entre a geologia e orientação das vertentes.

Geologia	Orientação										Somatório
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
N.C.	6658,82	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,00	0,02	6659,08
Aluvião	6,41	0,14	0,40	0,63	1,06	1,08	1,32	1,10	0,52	0,20	12,86
Charnockitos	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,12	0,09	0,07	0,43
Granulito anfibolito	11,40	9,68	16,70	11,51	9,71	12,68	14,57	8,33	9,48	6,51	110,56
Granulitos bandados	2,90	0,95	2,87	2,78	4,14	4,29	2,59	1,46	2,16	0,88	25,01
Granulitos paraderivados	0,54	0,63	0,69	0,43	0,19	0,43	0,51	0,42	0,77	0,45	5,04
Quartzito micáceo	0,12	0,12	0,15	0,16	0,20	0,07	0,08	0,11	0,36	0,16	1,51
Xisto	24,69	20,28	36,97	30,03	22,95	15,11	12,63	22,95	35,14	22,65	243,39
Somatório	6704,91	31,83	57,83	45,59	38,30	33,69	31,77	34,50	48,53	30,94	7057,88

A relação inversa (Tab. 5.53), da tabulação cruzada entre as áreas de ocorrência das classes de geologia e de orientação das vertentes, as orientações SE, S e SW apresentam menor correspondência para as rochas xistosas, para os quartzitos micáceos e para os charnockitos.

Tabela 5.52. Tabulação cruzada (em %) entre orientação das vertentes e geologia.

Geologia	Orientação (graus)										
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	Somatório
N.C.	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Aluvião	0	0	1	1	3	3	4	3	1	1	18
Charnockitos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Granulito anfibolito	0	30	29	25	25	38	46	24	20	21	258
Granulitos bandados	0	3	5	6	11	13	8	4	4	3	57
Granulitos paraderivados	0	2	1	1	0	1	2	1	2	1	12
Quartzito micáceo	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	4
Xisto	0	64	64	66	60	45	40	67	72	73	551
Somatório	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1000

Tabela 5.53. Tabulação cruzada (em %) entre geologia e orientação das vertentes.

Geologia	Orientação (graus)										
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	Somatório
N.C.	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Aluvião	50	1	3	5	8	8	10	9	4	2	100
Charnockitos	7	8	5	3	3	2	9	27	22	15	100
Granulito anfibolito	10	9	15	10	9	11	13	8	9	6	100
Granulitos bandados	12	4	11	11	17	17	10	6	9	4	100
Granulitos paraderivados	11	12	14	9	4	9	10	8	15	9	100
Quartzito micáceo	8	8	10	11	13	4	5	7	24	10	100
Xisto	10	8	15	12	9	6	5	9	14	9	100
Somatório	207	49	73	61	64	58	63	74	96	55	800

Quanto à relação entre as unidades geomorfológicas e a orientação das vertentes (Tab. 5.54, Tab. 5.55 e Tab. 5.56), pode-se destacar que os Chapadões de Goiânia (superfícies aplainadas - A e rampeadas - R) e o Planalto Embutido de Goiânia, superfícies de formas tabulares - t, coincidem em menor proporção com as vertentes voltadas para SE, S, SW e W.

Tabela 5.54. Tabulação cruzada (em km²) entre geomorfologia e orientação das vertentes.

Geomorfologia	Orientação										
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	Somatório
N.C.	6662,66	1,81	5,89	5,17	6,29	8,06	4,78	2,78	0,40	0,62	6698,47
PDG_a4	0,62	0,61	0,68	0,68	1,62	1,81	1,43	1,08	1,14	0,51	10,16
CG_A	1,37	2,27	2,50	1,94	0,82	0,54	0,98	1,56	3,69	1,71	17,39
CG_R	1,69	2,08	3,87	1,60	0,58	0,37	0,06	0,45	1,92	1,70	14,29
PEG_c1	8,47	9,93	15,96	11,13	6,75	4,29	7,55	11,80	18,57	13,35	107,78
PEG_c2	4,64	5,74	15,40	10,59	7,72	7,88	8,10	4,64	6,21	3,45	74,35
PEG_t	3,92	4,46	3,62	1,35	0,23	0,04	0,12	0,98	5,23	4,07	24,00
Tf	1,08	0,07	0,25	0,15	0,48	0,55	0,35	0,34	0,15	0,05	3,46
Pf	6,49	0,19	0,39	0,73	1,06	1,11	1,17	0,95	0,47	0,23	12,78
FV	14,00	4,68	9,28	12,25	12,77	9,05	7,25	9,93	10,77	5,25	95,20
Somatório	6704,91	31,83	57,83	45,59	38,30	33,69	31,77	34,50	48,53	30,94	7057,88

Tabela 5.55. Tabulação cruzada (em %) entre orientação das vertentes e geomorfologia.

Geomorfologia	Orientação										Somatório
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
N.C.	99	6	10	11	16	24	15	8	1	2	193
PDG_a4	0	2	1	1	4	5	4	3	2	2	26
CG_A	0	7	4	4	2	2	3	5	8	6	40
CG_R	0	7	7	4	2	1	0	1	4	5	30
PEG_c1	0	31	28	24	18	13	24	34	38	43	253
PEG_c2	0	18	27	23	20	23	25	13	13	11	174
PEG_t	0	14	6	3	1	0	0	3	11	13	51
Tf	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	6
Pf	0	1	1	2	3	3	4	3	1	1	17
FV	0	15	16	27	33	27	23	29	22	17	209
Somatório	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1000

Tabela 5.56. Tabulação cruzada (em %) entre geomorfologia e orientação das vertentes.

Geomorfologia	Orientação										Somatório
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
N.C.	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
PDG_a4	6	6	7	7	16	18	14	11	11	5	100
CG_A	8	13	14	11	5	3	6	9	21	10	100
CG_R	12	15	27	11	4	3	0	3	13	12	100
PEG_c1	8	9	15	10	6	4	7	11	17	12	100
PEG_c2	6	8	21	14	10	11	11	6	8	5	100
PEG_t	16	19	15	6	1	0	0	4	22	17	100
Tf	31	2	7	4	14	16	10	10	4	1	100
Pf	51	1	3	6	8	9	9	7	4	2	100
FV	15	5	10	13	13	10	8	10	11	6	100
Somatório	252	78	119	82	78	72	65	72	112	69	1000

As áreas das classes de solos correlacionam-se em porcentagem maior com as áreas planas, como é o caso dos solos do tipo Plintossolo Pétrico e Neossolo Flúvico. Solos do tipo Plintossolo Pétrico, em quantidade menos expressiva, também coincidem com as vertentes voltadas para NE e NW (Tab. 5.57, Tab. 5.58 e Tab. 5.59).

Tabela 5.57. Tabulação cruzada (em km²) entre solos e orientação das vertentes.

Solos	Orientação										Somatório
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
N.C.	6659,74	0,46	2,10	1,50	0,58	0,42	0,44	0,20	0,33	0,52	6666,29
Cambissolo Háplico	2,31	1,18	3,56	2,73	3,22	2,43	1,89	1,78	2,23	1,10	22,43
Latossolo Vermelho	31,55	28,10	48,33	37,91	30,42	26,23	25,14	28,78	41,80	27,69	325,95
Latossolo Verm.-Amarelo	1,01	0,61	0,95	0,66	0,72	0,81	1,01	1,30	1,41	0,39	8,88
Neossolo Flúv. e Gleissolo	8,50	0,69	1,97	1,57	1,14	1,21	1,19	0,99	1,00	0,50	18,76
Neossolo Litólico	0,75	0,14	0,35	0,79	1,65	1,60	1,10	0,89	0,61	0,15	8,01
Nitossolo Vermelho	0,83	0,59	0,49	0,42	0,53	0,98	1,00	0,54	1,06	0,55	6,98
Plintossolo Pétrico	0,22	0,05	0,08	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,09	0,03	0,58
Somatório	6704,91	31,83	57,83	45,59	38,30	33,69	31,77	34,50	48,53	30,94	7057,88

Tabela 5.58. Tabulação cruzada (em %) entre orientação das vertentes e solos.

Solos	Orientação										Somatório
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
N.C.	99	1	4	3	2	1	1	1	1	2	115
Cambissolo Háplico	0	4	6	6	8	7	6	5	5	4	51
Latossolo Vermelho	0	88	84	83	79	78	79	83	86	90	751
Latossolo Verm.-Amarelo	0	2	2	1	2	2	3	4	3	1	20
Neossolo Flúv. e Gleissolo	0	2	3	3	3	4	4	3	2	2	26
Neossolo Litólico	0	0	1	2	4	5	3	3	1	0	20
Nitossolo Vermelho	0	2	1	1	1	3	3	2	2	2	17
Plintossolo Pétrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Somatório	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1000

Tabela 5.59. Tabulação cruzada (em %) entre solos e orientação das vertentes.

Solos	Orientação										Somatório
	N.C.	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
N.C.	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Cambissolo Háplico	10	5	16	12	14	11	8	8	10	5	100
Latossolo Vermelho	10	9	15	12	9	8	8	9	13	8	100
Latossolo Verm.-Amarelo	11	7	11	7	8	9	11	15	16	4	100
Neossolo Flúv. e Gleissolo	45	4	11	8	6	6	6	5	5	3	100
Neossolo Litólico	9	2	4	10	21	20	14	11	8	2	100
Nitossolo Vermelho	12	8	7	6	8	14	14	8	15	8	100
Plintossolo Pétrico	39	9	13	6	7	3	1	3	16	5	100
Somatório	236	44	76	61	73	71	63	58	83	35	800

Um resumo das principais correlações encontradas a partir das tabulações cruzadas realizadas entre os atributos morfométricos, curvaturas plana e do perfil, declividade, hipsometria e orientação, e os atributos do meio físico, geologia, geomorfologia e solos podem ser enumeradas como a seguir.

O atributo curvatura do perfil apresentou em área, principalmente, as seguintes correlações: em relação à geologia, aluviões e granulitos paraderivados com curvaturas côncavas; em relação à geomorfologia, Planícies fluviais com curvaturas côncavas, Fundos de Vale e Planalto Dissecado de Goiânia com áreas equivalentes à aproximadamente a metade em curvaturas côncavas e convexas; em relação aos solos, àqueles do tipo Neossolo Flúvico e Gleissolo se relacionaram as curvaturas do perfil côncavas e aos solos do tipo Neossolo Litólico e Nitossolo Vermelho, curvaturas equivalentes em área à metade, côncavas e convexas.

A curvatura plana, que segue a conformação das curvas de nível, reflete as reentrâncias no relevo, como sulcos e canais secundários de drenagem ao longo das linhas de maior inclinação. Tal fato corrobora para a constatação de que, da tabulação cruzada entre a

curvatura plana e os atributos do meio físico podem ser destacadas apenas as áreas das classes côncavas correlacionadas em área com a classe de geomorfologia Fundos de Vale. As outras classes não apresentaram um padrão em que se destaque alguma correlação relativamente expressiva.

Já o atributo morfométrico entropia do relevo, que leva em conta uma vizinhança maior para o seu cálculo, apresentou as coincidências em áreas das classes com os atributos do meio físico, conforme o que se segue. Principalmente, no que se refere à geologia, aluviões coincidiram em área com alta entropia e os granulitos bandados com baixa entropia. Quanto à geomorfologia, o Planalto Dissecado de Goiânia apresentou correlação com baixa entropia; o Planalto Embutido de Goiânia - c2, com baixa à média entropia; o Planalto Embutido de Goiânia - c1, com média entropia; os Chapadões de Goiânia, superfície rampeada (R), o Planalto Embutido de Goiânia, superfícies com formas tabulares, os Terraços fluviais e as Planícies fluviais, com alta entropia. Em relação aos solos, as maiores correlações em porcentagem de área referiram-se aos solos do tipo Cambissolo com média a baixa entropia; Neossolo Litólico e Nitossolo Vermelho com baixa entropia.

Quanto à tabulação cruzada entre o atributo morfométrico declividade é possível destacar as relações a seguir. Em relação à geologia, as aluviões apresentaram maior correlação com menores declividades (0-7%); os granulitos anfibolitos e os xistos, com declividades de 0 a 14%; os granulitos bandados com declividades de 0 - 20%; os granulitos paraderivados e os quartzitos com declividades de 4 - 30%; e os charnockitos com declividades maiores que 7%. A geomorfologia apresentou as seguintes classes com maior coincidência em área: o Planalto Dissecado de Goiânia (a4) com declividades entre 4 e 30%; o Planalto Embutido de Goiânia - c2 com declividades de 2 a 14%; os Fundos de Vale com declividades entre 4 e 14%; os Chapadões de Goiânia (A e R) e o Planalto Embutido de Goiânia - c1 com declividades de 0 a 7%; e o Planalto Embutido de Goiânia, superfícies tabulares, Terraços fluviais e Planícies fluviais com declividades entre 0 e 2%. As principais correlações em área com os tipos de solo consistiram em solos do tipo Neossolo Flúvico e Gleissolo com declividades entre 0 e 2%; Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Amarelo, e Plintossolo Pétrico com declividades entre 0 e 14%; Cambissolo Háptico com declividades entre 4 e 20 %; Neossolo Litólico e Nitossolo Vermelho com declividades entre 4 e 30%.

Em se considerando a tabulação cruzada com os atributos do meio físico, a altitude relativa na área pode ser descrita como apresentado a seguir. Com referência à geologia, aluviões se relacionaram principalmente às menores altitudes; granulitos anfibolitos e rochas xistosas a altitudes intermediárias; granulitos bandados e paraderivados a altitudes desde as

menores até as maiores; e charnockitos às maiores altitudes. Em relação à geomorfologia, áreas das classes referentes ao Planalto Embutido de Goiânia - superfícies tabulares, Planícies fluviais e Terraços fluviais coincidiram na maioria (ou somente) com as menores altitudes; aos Chapadões de Goiânia (superfícies rampeadas) Planalto Embutido de Goiânia (c1 e c2) e Fundos de Vale, altitudes intermediárias; ao Planalto Dissecado de Goiânia (a4) e ao Chapadões de Goiânia (superfícies aplainadas) maiores altitudes. Quanto aos solos, é possível destacar as correlações dos solos do tipo Neossolo Flúvico e Gleissolo às menores altitudes; Latossolo Vermelho Amarelo e Plintossolo Pétrico às maiores altitudes.

Quanto ao atributo morfométrico orientação, que, conforme descrito neste capítulo, não apresenta correlações relativamente expressivas em quantidade de área, é possível destacar que, relativo à geologia, rochas xistosas apresentaram a menor coincidência com orientações para S e SW; em relação à geomorfologia, os Chapadões de Goiânia e o Planalto Embutido de Goiânia (superfícies tabulares) apresentaram menor coincidência com orientações para SE, S, SW e W; e solos do tipo Plintossolo Pétrico e Neossolo Flúvico e Gleissolo com áreas planas.

6. MODELAGEM DE DADOS DE INVESTIGAÇÕES DO SUBSOLO - GOIÂNIA

A espacialização de dados de sondagens do tipo SPT em geral tem a finalidade de auxiliar na compartimentação geotécnica do terreno, a partir da modelagem de espessuras de solo, definidas pelas cotas do impenetrável ao ensaio SPT; de se inferir espacialmente resistências do terreno, a partir do N_{SPT} , em determinada profundidade; de definição da profundidade do nível d'água; e de identificação de horizontes do solo.

Quando o modelo de mapas no qual as unidades são delineadas é inadequado, como é o caso de limites difusos ou indefinidos, ou quando as propriedades de interesse mostram forte variação dentro dos polígonos, a alternativa consiste na interpolação dos dados de cada perfil, de um atributo de cada vez, gerando superfícies representativas. E, se os dados disponíveis são suficientes, a utilização de métodos geoestatísticos de interpolação pode ser mais adequada, porque as propriedades do solo somente em casos raros variam de uma forma suave e contínua no espaço. A variação espacialmente correlacionada e irregular pode ser caracterizada pelo variograma, como função de correlação espacial. Semivariogramas (os quais representam graficamente essa medida de dependência), geralmente expressos pela

covariância, podem ser utilizados para expressar o comportamento da variável regionalizada (Davis, 1986; Burrough, 199; Landim, 1998).

Sturaro et al. (2000) destacam a importância da determinação da função de correlação espacial, o semivariograma, na modelagem matemática da variabilidade ou continuidade espacial de variáveis que possuem uma regionalização no espaço. Dados e informações advindas de sondagens de reconhecimento do solo, na maioria do tipo SPT, têm sido espacializados por métodos geoestatísticos de krigagem (Sturaro & Landim, 1996; Augusto Filho, et al., 1999; Sturaro et al., 2000; Xavier & Romanel, 2000; Folle et al., 2001; Genevois & Oliveira, 2001; Abel, 2002). Aos dados são aplicados métodos de krigagem variando de acordo com a forma do semivariograma.

Sturaro & Landim (1996) aplicaram a metodologia geoestatística para verificar o comportamento espacial de 720 sondagens SPT, em Bauru (SP). Mapearam-se nesse trabalho valores médios de índices de SPT para o horizonte superficial do perfil de alteração, por meio da utilização da técnica da krigagem ordinária. Sturaro & Landim (1996) constataram, a partir de uma análise variográfica, uma componente aleatória para a variabilidade espacial dos valores mapeados.

De igual modo, Sturaro et al. (2000) realizaram, a partir da técnica da krigagem indicativa, a estimativa da distribuição da probabilidade acumulada das variáveis, espessura do solo e profundidade do lençol freático, a partir de sondagens de simples reconhecimento, na região do sítio urbano de Bauru (SP). Devido às características geotécnicas da área estudada, uma compartimentação inicial em unidades homogêneas foi realizada. Tal delimitação consistiu em fundamento para a análise geoestatística dos dados de sondagens. A análise das duas variáveis referidas foi considerada como importante, ao se observar o aquífero Bauru, livre na região e altamente vulnerável à contaminação. Dessa forma, foi elaborado um mapa que indicou a favorabilidade para a localização de um aterro sanitário, em bases probabilísticas.

Ensaio de penetração SPT realizados no sítio da Usina Nuclear de Angra 2 (RJ), para reconhecimento da estratigrafia e das propriedades de engenharia, apresentados por Xavier e Romanel (2000), foram utilizados com o principal objetivo de estimar a distribuição espacial das características geotécnicas do subsolo nessa região. Por meio da aplicação do método da krigagem ordinária aos dados referentes ao número de golpes (índice N_{spt}), foram construídos modelos variográficos para os vários níveis de profundidade. Métodos clássicos de estimativa também foram realizados e comparados ao geoestatístico, apresentando o método geoestatístico, em geral, uma melhor modelagem, quantificando os erros e identificando

importantes propriedades globais do maciço, relacionadas com a variabilidade espacial, como direções de anisotropia e distâncias de continuidade.

Tem-se também o caso de trabalho de Augusto Filho et al. (1999), que descrevem a espacialização da média dos valores de SPT por profundidade, dos relatórios analisados. A análise realizada por relatório foi devida à escala de estudo (1:25.000) e à proximidade relativa dos furos em cada obra. O referido trabalho também destaca aspectos relativos a incertezas decorrentes da fonte e da natureza dos dados de sondagem, considerados na modelagem geoestatística. Augusto Filho et al. (1999) descreveram a compartimentação geotécnica da área urbana e periurbana do município de São José do Rio Preto (SP,) onde para uma área de 78 km² foram analisados 64 locais de sondagem. Os programas utilizados foram o *Surfer* para a espacialização e o *GeoEas* para geração de semivariogramas dos valores obtidos. Além de outras correlações, foram analisados índices de concentração de ocorrências de processos erosivos em compartimentos de isoespessura de solos e isovalores de SPT a determinadas profundidades. As classes definidas nos mapas foram orientadas pelas faixas de valores obtidas nas modelagens matemáticas e também foram orientadas pela expressão dos compartimentos em área, compatíveis à densidade de amostragem e à escala de trabalho.

Folle et al. (2001) realizaram uma modelagem geoestatística do índice de penetração SPT, por krigagem ordinária (124 sondagens para 4,16 km², na área urbana de Passo Fundo/RS) em blocos de dimensões de 100x100 m em três níveis de profundidade. A segmentação em níveis foi definida a partir de inflexões de uma curva de regressão relacionando o índice de resistência à penetração, N_{SPT} , com a profundidade, que no caso em questão cresceu aproximadamente de forma linear com a profundidade do solo. Para cada nível, Folle et al. (2001) apresentaram os histogramas, medidas de dispersão e coeficientes de variação dos valores de N_{SPT} . O efeito pepita identificado nos variogramas foi explicado por problemas de heterogeneidade do material, técnica de escavação, equipamento e procedimento de execução do ensaio. Na análise da variabilidade da estimativa, Folle et al. (2001) avaliaram o coeficiente de variação dos valores estimados de cada bloco, e geraram mapas de coeficiente de variação.

Genevois & Oliveira (2001) apresentaram a determinação da distribuição espacial de camadas de solo mole, e de suas espessuras, localizadas na cidade do Recife. Esta determinação foi realizada por meio da utilização de modelagem geoestatística de dados de sondagem do tipo SPT, determinando o variograma de espessura das camadas de solo mole e realizando, a partir da krigagem, o traçado de curvas de igual espessura dessas camadas. Genevois & Oliveira (2001) utilizaram o programa *Variowin* para determinação do

variograma, e os seus parâmetros foram levados ao programa *Surfer* para geração de curvas de isovalores.

Corrêa et al. (2001) também discorrem sobre um processo de modelagem do perfil do solo e localização do nível d'água no Rio de Janeiro, a partir dos dados de sondagens do tipo SPT, cujo processamento dos dados envolveu a utilização dos programas *ArcView*, extensão *3DAnalyst*, e *GoCad*. O processo de interpolação não se encontra descrito. Destaca-se a utilização neste trabalho de ferramentas de visualização em três dimensões, incluindo a representação em superfície e subsuperfície, em forma de bloco diagrama.

Moreira (2002) ao realizar o mapeamento geotécnico em escala de semidetalhe (1:25.000), da área urbana do município de Natal, RN, também gerou um banco de dados georeferenciados de informações de sondagens geotécnicas, e definiu perfis representativos de sondagens do tipo SPT, em que foram delimitados os horizontes geológicos e suas espessuras.

Talamini Neto & Celestino (2001) elaboraram um modelo geológico com recursos de navegação virtual em três dimensões ao realizarem o mapeamento geotécnico do subsolo de Curitiba, visando a orientação da ocupação subterrânea. Além de dados de sondagens de simples reconhecimento com SPT, foram utilizados dados relativos a poços, cartas topográficas e trabalho de campo. O banco de dados foi elaborado no *Access 97*, foram exportadas tabelas *dbase* (com extensão *.dbf*) para o *ArcView 3.1* e geradas imagens artificiais no *Surfer 7.0*, a partir de mapas na escala de 1:20.000, com equidistância entre as curvas de nível de 5 m. As profundidades de camadas litológicas de interesse e o N_{SPT} foram modelados por krigagem.

6.1. MODELAGEM NUMÉRICA DOS DADOS DE SONDAJENS GEOTÉCNICAS

A elaboração do banco de dados alfanuméricos na presente pesquisa foi feita a partir de um levantamento de relatórios, disponibilizados por empresas de engenharia atuantes na região, de sondagens à percussão (ensaio de penetração padronizado - SPT). Foram compilados dados de 1.400 furos relativos aos boletins dos relatórios de sondagens SPT, com informações do número de golpes, índice N_{SPT} , a cada metro. Também foram compiladas informações como a profundidade do nível d'água.

Do total de furos de sondagem compilados no banco de dados digital, foram localizados espacialmente 560 furos – além de outros tipos de sondagem descritos a seguir – (Fig. 6.1) a partir da utilização do aplicativo SIGGO v2.0 / COMDATA (1999) e de listas de endereços da cidade, em relação aos respectivos lotes e/ou quadras, codificados em

coordenadas da posição espacial, no sistema UTM, datum horizontal SAD69, meridiano central 51° a oeste de Greenwich. Estes dados foram referenciados à base cartográfica digital, o MUBDG, v.13 (COMDATA, 2001), por meio dos programas SPRING v.3.6.03 e *ArcGis* 8.2.

O banco de dados digital relativo às sondagens foi construído no programa *Microsoft Access* 97, com a elaboração de formulários visando a agilização da entrada de dados (Fig. 6.2), idealizado a partir de Talamini Neto & Celestino (2001).

Nos formulários constam os valores relativos aos números de golpes referentes ao índice N_{spt} e em parte deles constam as descrições, de forma a abranger as informações dos boletins de sondagem das diversas empresas, elaborados em diferentes épocas. Uma programação foi realizada de forma a se inserir os dados relativos às descrições de cada trecho do perfil de sondagem, de forma rápida, clicando sobre as combinações esperadas de tipos de solo e complementos (por exemplo, argila arenosa com pedregulhos, micácea), de cor e complementos (por exemplo, vermelho com veios cinza) e consistência ou compacidade (por exemplo, compacta), além de sua origem (por exemplo, orgânica, aterro ou alteração de rocha).

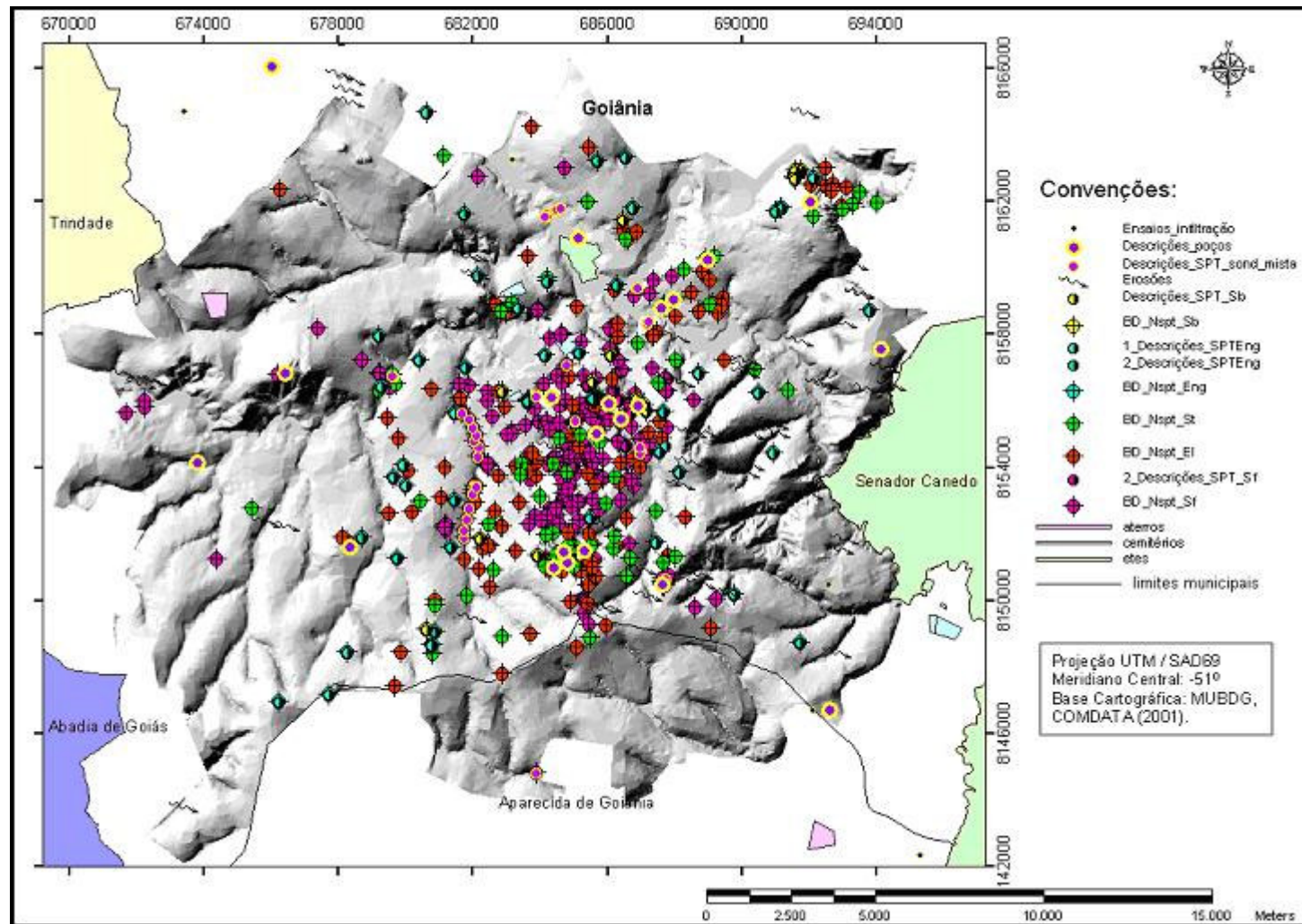


Figura 6.1. Localização dos furos de sondagens do tipo SPT, sondagens rotativas, ensaios de infiltração e poços subterrâneos, além da ocorrência de processos erosivos.

CÓD	19	Com revestimento?	<input checked="" type="checkbox"/>	Fechamento do furo?	<input type="checkbox"/>
Número Relatório	301000	Comprimento revestimento	10	Profundidade do Fechamento	
Número Furo	SP01-a	Limite da Sondagem	13,45	Perfuração por Lavagem?	<input checked="" type="checkbox"/>
Local Referência de Nível		Impenetrável ao SPT?	<input type="checkbox"/>	Início da Lavagem	11,45
Cota da Referência de Nível		Furo Seco?	<input type="checkbox"/>		
Cota da Boca do Furo		Profundidade Nível d'água1	9,85		
Desnível em relação ao RN	0,9	Data de medição - NA1	26-out-00		
Data da Sondagem	25-out-00	Profundidade Nível d'água2			
Bairro	St Leste Universitário	Data de medição - NA2			
Coordenadas Planas (UTM/SAD69,-51°):		Observação:			
X					
Y					
Profundidade Camada 1	-1	Tipo de solo Camada1	Argila	Complemento Camada1	
Profundidade Camada 2	-2	Tipo de solo Camada2	Argila	Complemento Camada2	
Profundidade Camada 3	-3	Tipo de solo Camada3	Argila silteosa	Complemento Camada3	
Profundidade Camada 4	-4	Tipo de solo Camada4	Argila arenosa	Complemento Camada4	
Profundidade Camada 5	-6	Tipo de solo Camada5	Silte argiloso	Complemento Camada5	
Profundidade Camada 6	-8	Tipo de solo Camada6	Silte arenoso	Complemento Camada6	
Registro: 14	1				

Figura 6.2. Formulário construído para entrada dos dados no banco de dados de sondagens SPT (formulário relativo às descrições existentes nos boletins de sondagem).

Além dos bancos de dados digitais relativos aos boletins de sondagens de reconhecimento e ensaio de penetração dinâmica, foram também construídos outros bancos com dados digitais de sondagens mistas (Fig. 6.3), realizadas por uma das empresas de engenharia.

CÓD		Número Furo	SR01
teste	1	Referência de Nível	
Número Relatório	744	Cota do Furo	4
X	686936,9	Impenetrável ao SPT?	<input type="checkbox"/>
Y	8159387,21	Limite da Sondagem	6
Descrição 1	Homblenda Grosse, cinza claro, granulometria fina a média, bom bandamento, lente de máficos orientadas, calcinação, porosidade baixa. (da superfície até 70 cm)		
Descrição 2	Biotita Homblenda Grosse, verde escuro (máficos) e verde claro (níveis quartzo-feldspáticos), granulometria média, alteração incipiente, porosidade baixa. (da prof. anterior até 6m)		
	Profundidade Nível d'água1		0,3
	Data de medição - NA1		21-out-77
	Profundidade Nível d'água2		
	Data de medição - NA2		
Data	21-out-77		
Bairro	Sta Geneveva		
Categoria			

Figura 6.3. Formulário construído para entrada dos dados no banco de dados de sondagens mistas (formulário relativo às descrições existentes nos boletins de sondagem).

Dados de descrições de poços (Fig. 6.4) e de ensaios de infiltração, disponibilizados em Campos et al. (2003); e dados relativos a localizações e descrições de pontos de ocorrência de processos erosivos, disponibilizados por Nascimento & Sales (2003) também se encontram compilados nos bancos de dados digitais relativos ao banco de dados georreferenciados, da presente pesquisa.

ID	<input type="text" value="3"/>	Observações:	<input type="text"/>
nº POCO	<input type="text" value="1"/>		
Cod POCO	<input type="text" value="327"/>		
Endereço	<input type="text" value="Rua T-38 Setor Bueno"/>	Prof	<input type="text" value="100"/>
Municip	<input type="text" value="Goiania"/>	Vazao	<input type="text" value="3,5"/>
Dat_ini	<input type="text" value="29/12/1992"/>	NE	<input type="text" value="9"/>
Dat_perf	<input type="text" value="19/01/1993"/>	ND	<input type="text" value="66"/>
		EA	<input type="text"/>
X	<input type="text" value="604700"/>		
Y	<input type="text" value="8151431"/>		
Prof inicial:	<input type="text" value="0"/>	Tipo de Rocha (Grupo, Formação):	<input type="text" value="Araçá"/>
Prof camada 1:	<input type="text" value="6"/>	Descrição Litológica camada 1:	<input type="text" value="Solo argiloso avermelhado com presença de grãos de quartzo."/>
Prof camada 2:	<input type="text" value="44"/>	Descrição Litológica camada 2:	<input type="text" value="Gnaiss alterado cinza amarelado com elevada presença de micas."/>
Prof camada 3:	<input type="text" value="100"/>	Descrição Litológica camada 3:	<input type="text" value="Gnaiss cinza, inalterado, textura granoblástica, com presença de granadas como mineral acessório."/>
Prof camada 4:	<input type="text"/>	Descrição Litológica camada 4:	<input type="text"/>
		Descrição Litológica camada 5:	<input type="text"/>

Registro: 14 de 34
Modo Formulário

Figura 6.4. Formulário construído para entrada dos dados no banco de dados de poços, disponibilizados em Campos et al. (2003).

As informações compiladas permitiram o entendimento da distribuição de propriedades geotécnicas referentes aos compartimentos definidos na modelagem da superfície do terreno para cada atributo morfométrico. Os valores relativos aos índices N_{spt} foram espacializados segundo o método de interpolação denominado de Método da Vizinhança Natural, disponível no programa *ArcGIS* 8.2. O método da vizinhança natural consiste numa interpolação por média ponderada pelo inverso da distância que cria uma triangulação de *Delaunay* dos pontos de entrada e seleciona os nós mais próximos na parte convexa formada pelas facetras em torno dos pontos de interpolação, e a partir dessa vizinhança denominada natural pondera os seus valores de forma proporcional a essa área convexa. Esse método é mais apropriado em casos em que os pontos amostrados são

distribuídos com densidade descontínua, sendo uma técnica de interpolação que tem a vantagem de não ser necessário se especificar parâmetros tais como raio, número de pontos vizinhos, ou mesmo de ponderações (McCoy & Johnston, 2002). Logo, foi aplicado esse método de modelagem às amostras utilizadas a partir das sondagens geotécnicas realizadas na área de estudos, por estarem concentradas na região central de Goiânia, e possuir uma densidade espacial descontínua.

A partir dos valores de Nspt contidos no banco de dados foram realizadas consultas específicas, tais como a espessura dos materiais inconsolidados e a profundidade do nível d'água. Modelos numéricos de terreno foram então elaborados segundo o método da vizinhança natural, para a modelagem dos índices Nspt a determinadas profundidades, para a modelagem da espessura do material inconsolidado, e para a modelagem da profundidade do nível d'água a partir da superfície, considerando as duas estações ao longo do ano, para os meses de abril a setembro (estação seca) e para os meses de outubro a março (estação chuvosa). Com a finalidade de comparação, para a modelagem da espessura dos materiais inconsolidados também foi realizada a modelagem por krigagem ordinária.

6.2. DISTRIBUIÇÃO DE ATRIBUTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS NOS COMPARTIMENTOS DO TERRENO

Como já descrito, a modelagem dos dados dos perfis individuais de sondagens do subsolo, nos quais constam os valores de penetração e da classificação dos trechos atravessados, por profundidade, permitiu a análise da distribuição dos atributos geotécnicos, não somente da espessura dos materiais inconsolidados e profundidade do nível d'água, mas também da sua textura. Perfis geológicos representativos dos materiais inconsolidados na área de estudos foram também elaborados a partir dos dados de sondagens geotécnicas simples e mistas e de poços.

Presentes sobre o substrato rochoso composto por rochas granulíticas ortoderivadas (granulitos anfíbolitos) e paraderivadas (granulitos bandados e paraganulitos), na parte norte da área de estudos existe um horizonte superficial de material de textura argilosa, por vezes consistindo em uma argila arenosa, descrita como possuindo cor vermelha a marrom. Esse material ocorre comumente com espessuras entre 4 a 5 metros desde a superfície e possui em geral resistências à penetração de 3 a 5 golpes. Embora não seja comum, a espessura desse material argiloso pode atingir até 11 metros. E a resistência desse material tem seus valores aumentados em presença de pedregulhos de quartzo, chegando à ordem de 10 golpes, e em presença de concreções aos 30 golpes. Diferentemente da continuidade espacial da primeira

parte do perfil em profundidade, o material que ocorre sob esse horizonte consiste em argilas e siltes. Um dos perfis freqüentes que se pode descrever apresenta, a partir do horizonte superficial argiloso, um material siltoso a silto arenoso, em geral variegado, com espessuras que variam de 3 a 8 metros, e índices Nspt variando de 10 a 30 golpes. Em alguns casos essa parte do horizonte siltoso é descrita a profundidades de 9 a 14 metros com índices maiores que 40 golpes (considerados nesta pesquisa como impenetráveis à sondagem à percussão). Em outros casos o perfil é descrito como de material argiloso a argilo siltoso ou argilo arenoso, alcançando profundidades de 3 a 11 metros. Nesse perfil a argila apresenta contribuição arenosa sobre granulitos paraderivados e siltosa sobre os ortoderivados. A resistência desse material então varia de acordo com essa textura, em que os materiais argilo siltosos apresentam índices Nspt variando de 5 a 12 golpes e os materiais argilo arenosos apresentam índices de 4 a 30 golpes, com ocorrência comum nesses últimos de pedregulhos e concreções.

Sobre as rochas xistosas, na parte central da área urbana, ao sul do ribeirão Anicuns, ao longo dos primeiros metros de profundidade ocorre um horizonte também de material argiloso a argilo-arenoso de cor vermelha. As espessuras comuns para esse material variam de 3 a 7 metros, sendo mais freqüentes as espessuras em torno de 5 a 7 metros. Os índices de resistência à penetração, Nspt, para esses trechos do perfil em profundidade, variam entre 2 e 7 golpes. Em presença de pedregulhos de quartzo esse material argiloso apresenta índices Nspt maiores, apontando valores de até 20 golpes. A ocorrência de um material classificado como argiloso micáceo ou siltoso micáceo (ocorrência menos comum das areias micáceas) a profundidades maiores que 3 m, em geral com espessuras variando de 2 a 3 m é concordante espacialmente com as rochas xistosas micáceas do substrato. Com 1 a 2 m de espessura ocorrem também lentes de areia, possivelmente ligada à presença de veios de quartzo bastante intemperizados. Apesar de não se mostrar tão bem definida como na primeira parte do perfil em profundidade, é comum nesse manto de alteração situado sobre os xistos, a existência de material siltoso subjacente, de cor vermelha a variegada, por vezes com pedregulhos. A resistência desse material siltoso varia muito, assim como intercalações de materiais arenosos e micáceos, e contribuições micáceas ao próprio material, aumentando com a profundidade de 4 a 30 golpes, até valores correspondentes ao impenetrável. A espessura desse material siltoso é mais comum de 4 a 7 metros.

A presença de pedregulhos pode ser associada ao aumento da resistência à penetração, pelo aumento do tamanho médio das partículas, conforme pode ser observado em alguns perfis de solo da área de pesquisa. Schnaid (2000) aponta essa correlação como influência das

propriedades de solos granulares na resistência. Já a presença de material micáceo correlacionou-se a uma diminuição dessa resistência.

A descrição e modelagem dos valores N_{spt} realizada nesta pesquisa pode ser considerada como tendo maior confiabilidade na região de maior densidade de pontos, relativos às sondagens de investigação compiladas na base de dados digitais, a qual coincide com a parte central da área urbana de Goiânia, de forma mais ou menos longitudinal, na direção norte-sul.

Quanto aos pontos morfométricos elementares e à distribuição dos atributos geotécnicos, no que se refere à textura, espessura e resistência desses materiais descritos, é possível apontar as correlações que se seguem. O material argiloso ocorre em sua maior parte nas vertentes orientadas para noroeste e oeste, cujas orientações preferenciais são devidas ao sistema de falhamento presente na área de estudos.

Como comentado no item anterior, a espessura dos materiais inconsolidados foi modelada pelos métodos da vizinhança natural e krigagem, considerando-se como limite os índices N_{spt} maiores que 40 golpes (Fig. 6.5 e Fig. 6.6). Não foram considerados como limite os valores que, mesmo maiores que 40 golpes, não significaram o término do ensaio, e sim ocorrências tais como lentes compostas por pedregulhos de quartzo ou concreções lateríticas. Outra modelagem realizada para a espessura dos materiais inconsolidados consistiu nos valores referentes àqueles casos onde o ensaio foi terminado mesmo sem a ocorrência desses valores máximos (Fig. 6.7). Na modelagem da espessura os maiores valores se localizaram principalmente na região de menor declividade e maior entropia e na sua maioria nas as quebras negativas do relevo, marcadas pelas curvaturas côncavas das vertentes (curvatura do perfil). Tais quebras estão situadas na região central de Goiânia, associadas à unidade geomorfológica Planalto Embutido de Goiânia. As regiões de maior declividade na sua maior parte associadas ao substrato rochoso de granulitos paraderivados e quartzitos apresentaram a maior porcentagem das menores espessuras de solo de coincidência em área. As sondagens mais profundas sem que o impenetrável fosse atingido mostrou uma mesma tendência das que atingiram, principalmente para a região de maior densidade de pontos. Quanto aos métodos de modelagem, comparando-se o método da vizinhança natural ao método da krigagem ordinária, a região de maior densidade de amostras apresentou configurações equivalentes, diferindo no restante da área de estudos, justamente por causa da baixa densidade de pontos.

Tabulações cruzadas entre os atributos morfométricos e do meio físico com os atributos geotécnicos da área de estudos são apresentadas a seguir. Tais tabulações confirmam essas correlações supracitadas.

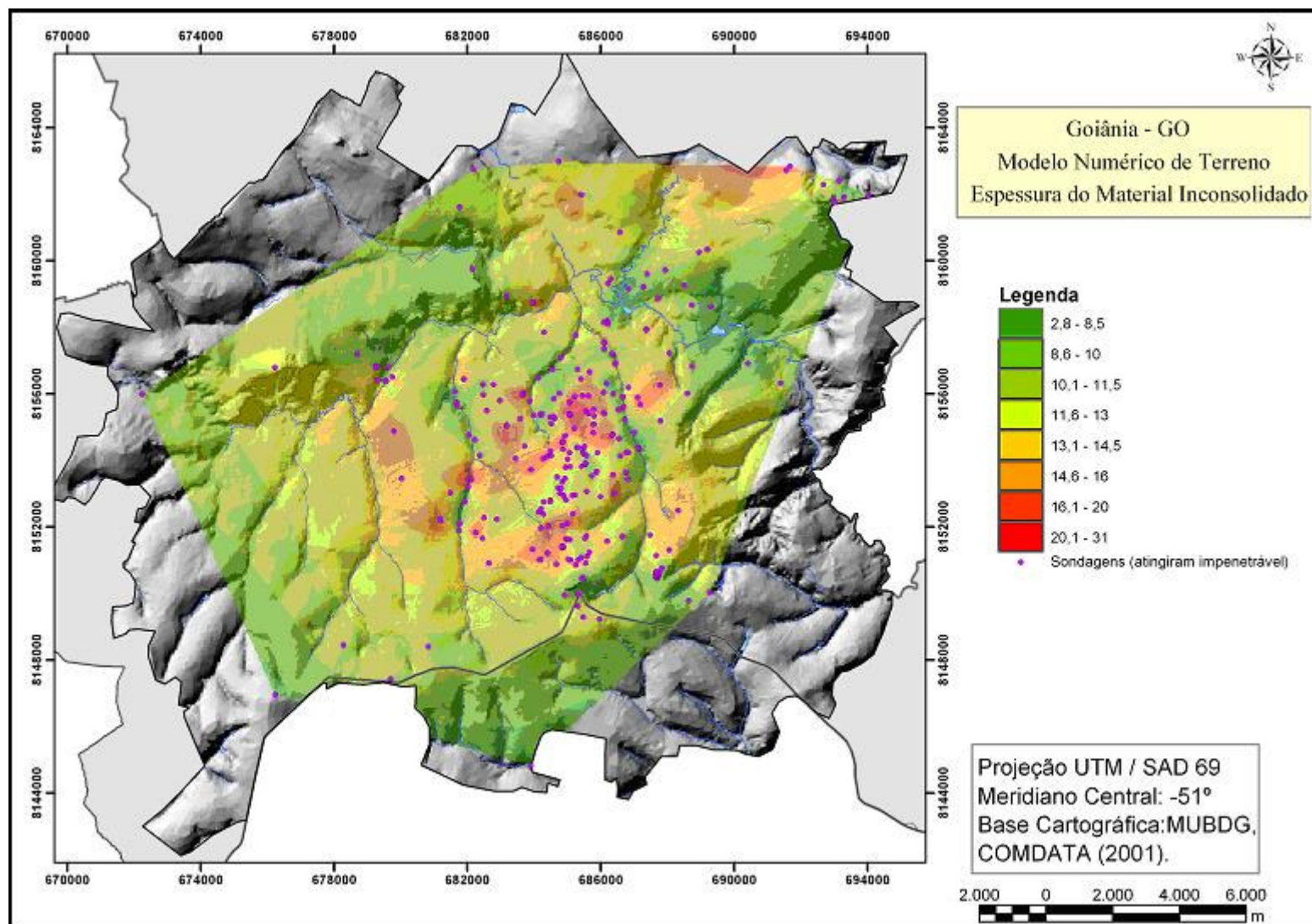


Figura 6.5. Profundidade do impenetrável em metros, considerando como limite índices N_{spt} maiores do que 40 golpes. Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.

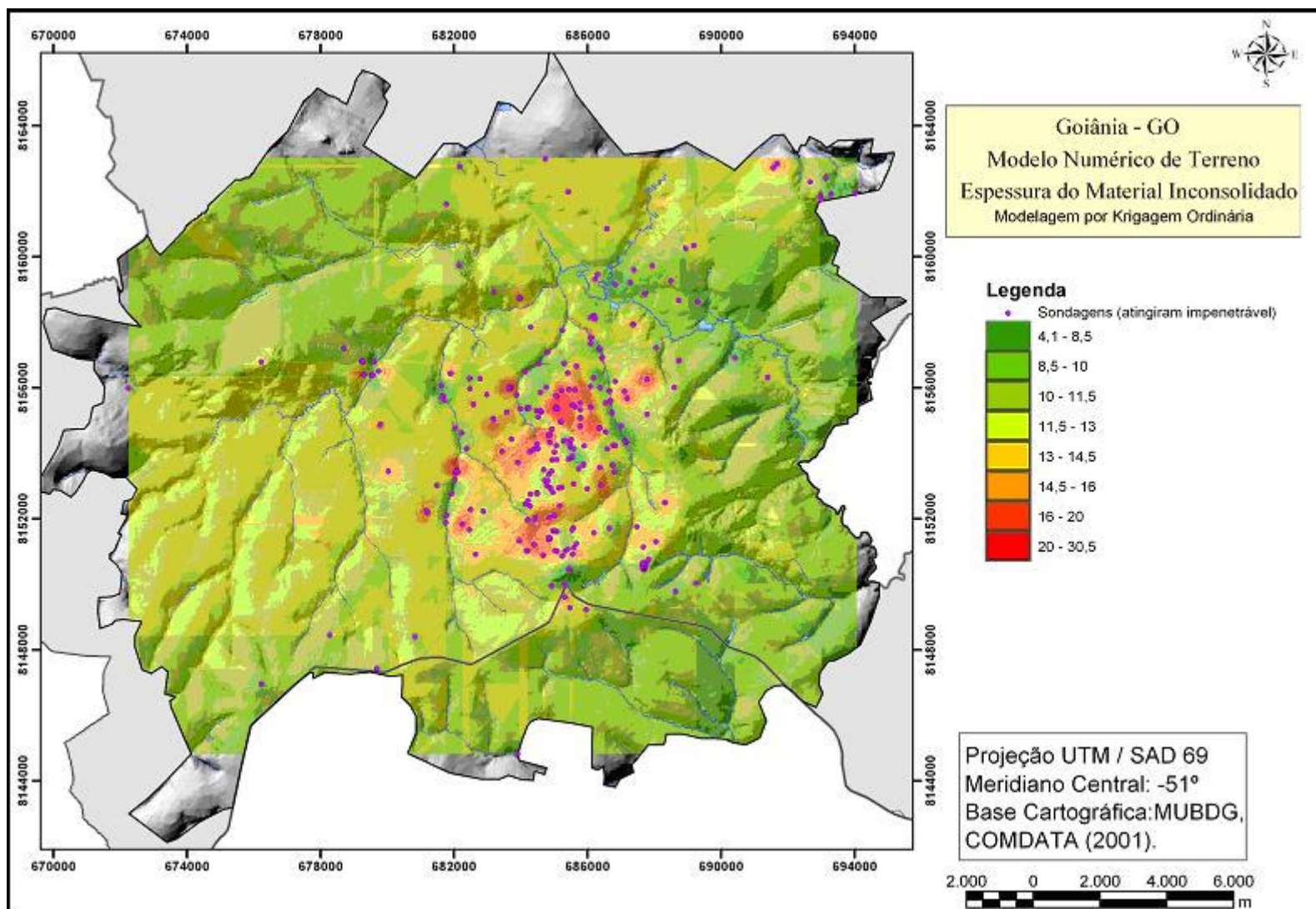


Figura 6.6. Profundidade do impenetrável em metros, considerando como limite índices Nsp_t maiores do que 40 golpes. Modelagem realizada segundo o método da krigagem ordinária.

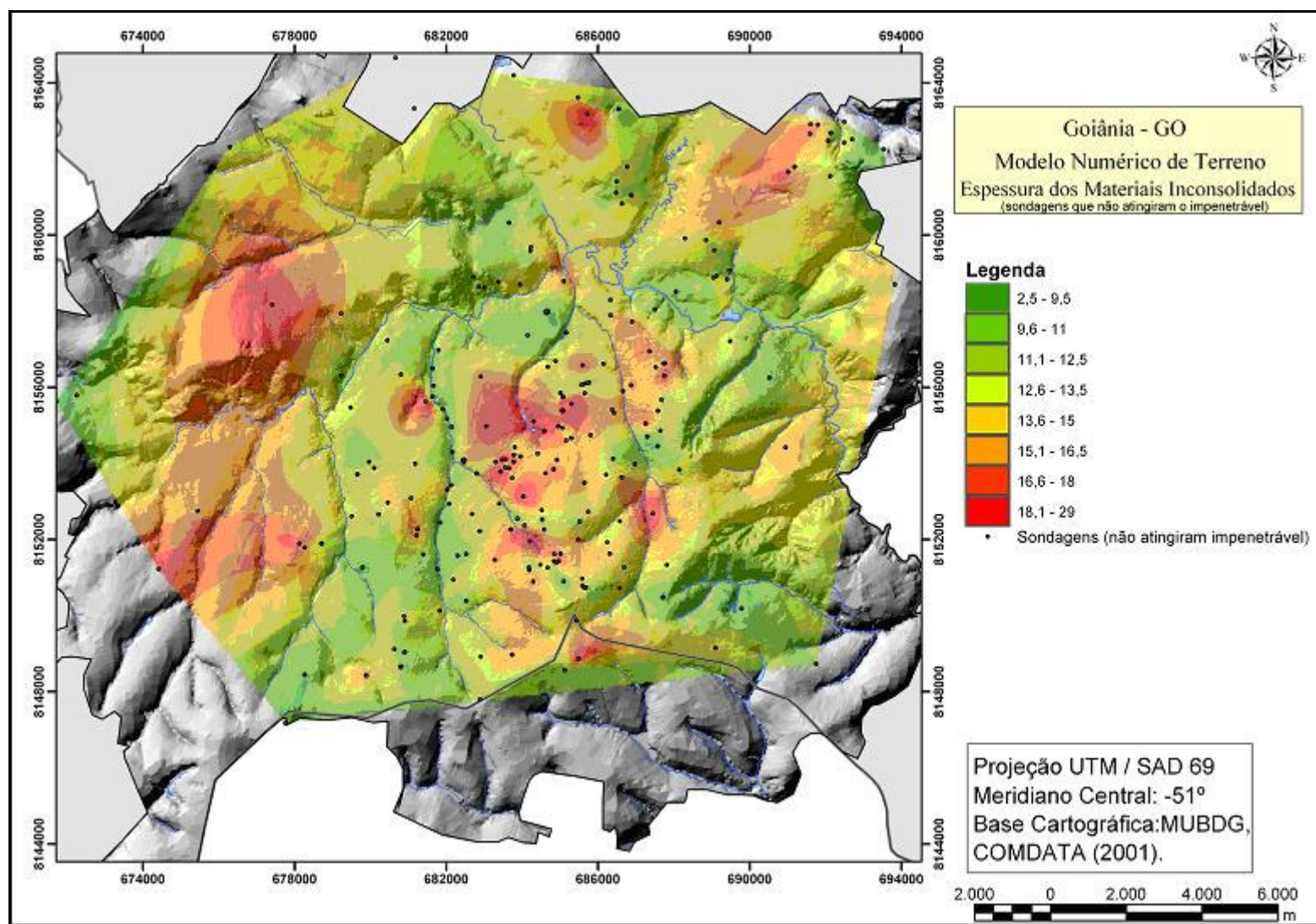


Figura 6.7. Espessura do material inconsolidado em metros onde as sondagens não atingiram o impenetrável, considerado o impenetrável como possuindo índices maiores que 40 golpes. Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.

As principais tabulações cruzadas, as quais permitem a análise das correlações em área das classes de espessura do material inconsolidado (definida pela profundidade onde o índice Nspt atingiu 40 ou mais golpes) com os atributos morfométricos e do meio físico são apresentadas a partir da Tab. 6.1. Somente as tabulações que apresentaram correlações significativas em porcentagem de área foram destacadas.

Quanto à relação entre a curvatura do perfil e a espessura do material inconsolidado (Tab. 6.1 e Tab. 6.2), apesar de auxiliar na definição de quebras negativas no relevo, as curvaturas côncavas não são predominantes em comparação às convexas, e sim equivalentes em área em aproximadamente a metade, coincidentes com as maiores espessuras.

Tab. 6.1. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura do material inconsolidado e a curvatura do perfil (resolução 100m).

Espessura Mat. Inconsolidado	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
2,8-8,5	4,25	0,40	6,58	11,23
8,5-10	11,98	0,43	19,21	31,62
10,1-11,5	30,27	1,44	41,96	73,67
11,5-13	29,27	1,75	39,55	70,57
13-14,5	17,50	1,36	23,32	42,18
14,5-16	5,36	0,26	7,61	13,23
16-20	2,42	0,23	2,56	5,21
20-31	0,54	0,00	0,60	1,14
Somatório	101,59	5,87	141,39	248,85

Tab. 6.2. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a curvatura do perfil (resolução 100m).

Espessura Mat. Inconsolidado	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
2,8-8,5	38	4	59	100
8,5-10	38	1	61	100
10,1-11,5	41	2	57	100
11,5-13	41	2	56	100
13-14,5	41	3	55	100
14,5-16	41	2	58	100
16-20	46	4	49	100
20-31	47	0	53	100
Somatório	334	19	447	800

Quando se observam as correlações em porcentagem de área da espessura do material inconsolidado com a altitude (Tab. 6.3 e Tab. 6.4), é possível destacar que as maiores

espessuras coincidem em maior área com menores altitudes (726 a 764 m) e que em relação às maiores espessuras, essas não ocorrem nas maiores altitudes (> 842 m).

Tab. 6.3. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura do material inconsolidado e intervalos de altitude.

Espessura Mat. Inconsolidado	Altitude (m)					Somatório
	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
2,8-8,5	5,36	1,38	2,77	0,97	0,97	11,44
8,5-10	5,72	5,95	7,11	10,58	2,47	31,83
10,1-11,5	9,69	20,60	21,44	17,44	4,97	74,13
11,5-13	15,71	24,26	18,00	10,43	2,66	71,06
13-14,5	10,93	14,38	12,63	4,18	0,37	42,48
14,5-16	2,72	5,62	3,22	1,80	0,02	13,38
16-20	0,35	2,55	1,29	1,09	0,00	5,28
20-31	0,00	0,95	0,06	0,02	0,00	1,02
Somatório	50,49	75,69	66,51	46,50	11,44	250,61

Tab. 6.4. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e intervalos de altitude.

Espessura Mat. Inconsolidado	Altitude (m)					Somatório
	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
2,8-8,5	47	12	24	8	8	100
8,5-10	18	19	22	33	8	100
10,1-11,5	13	28	29	24	7	100
11,5-13	22	34	25	15	4	100
13-14,5	26	34	30	10	1	100
14,5-16	20	42	24	13	0	100
16-20	7	48	24	21	0	100
20-31	0	93	6	1	0	100
Somatório	153	310	185	125	28	800

A tabulação cruzada entre as áreas das classes de espessura do material inconsolidado e as áreas das classes de declividade mostrou uma coincidência maior entre as maiores espessuras e os menores valores de gradiente (Tab. 6.5 e Tab. 6.6).

Em relação à orientação das vertentes a tabulação cruzada com as áreas das classes de espessura do material inconsolidado apresentou maior correlação das maiores espessuras com as vertentes voltadas para NW, W, N e NE (Tab. 6.7 e Tab. 6.8).

Quanto às áreas das classes de espessura do material inconsolidado em tabulação cruzada com a carta de entropia, as maiores espessuras apresentaram os maiores valores de entropia do relevo (Tab. 6.9 e Tab. 6.10).

Tab. 6.5. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura do material inconsolidado e a declividade.

Espessura Mat. Inconsolidado	Declividade							Somatório
	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
2,8-8,5	2,26	2,59	3,65	2,39	0,35	0,18	0,04	11,44
8,5-10	5,27	7,85	10,74	6,85	0,79	0,27	0,06	31,83
10,1-11,5	13,87	19,43	26,81	10,93	1,83	0,79	0,47	74,12
11,5-13	15,31	19,69	19,97	11,17	2,77	1,47	0,69	71,05
13-14,5	10,95	14,47	10,97	5,00	0,77	0,25	0,07	42,48
14,5-16	4,44	4,83	3,15	0,83	0,11	0,02	0,00	13,38
16-20	1,31	2,18	1,50	0,18	0,07	0,05	0,00	5,28
20-31	0,53	0,45	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	1,02
Somatório	53,92	71,48	76,83	37,35	6,67	3,02	1,33	250,60

Tab. 6.6. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a declividade.

Espessura Mat. Inconsolidado	Declividade							Somatório
	0-2%	2-4%	4-7%	7-14%	14-20%	20-30%	>30%	
2,8-8,5	20	23	32	21	3	2	0	100
8,5-10	17	25	34	22	2	1	0	100
10,1-11,5	19	26	36	15	2	1	1	100
11,5-13	22	28	28	16	4	2	1	100
13-14,5	26	34	26	12	2	1	0	100
14,5-16	33	36	24	6	1	0	0	100
16-20	25	41	28	3	1	1	0	100
20-31	52	44	3	0	0	0	0	100
Somatório	212	257	211	95	16	7	2	800

Tab. 6.7. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura do material inconsolidado e a orientação das vertentes.

Espessura Mat. Inconsolidado	Orientação									Somatório
	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
2,8-8,5	0,69	1,11	0,82	1,38	1,85	1,55	0,87	0,54	0,72	9,50
8,5-10	2,15	3,12	4,13	4,67	4,29	2,90	2,97	2,38	1,86	28,44
10,1-11,5	7,13	11,56	7,53	6,26	5,45	4,04	5,11	9,70	8,12	64,90
11,5-13	5,41	8,49	7,64	6,88	4,18	5,41	6,32	10,70	6,34	61,36
13-14,5	3,44	6,76	4,63	2,20	1,49	2,18	4,86	6,42	3,77	35,74
14,5-16	0,80	0,90	0,79	0,44	0,57	0,98	1,88	3,88	1,41	11,63
16-20	0,70	0,31	0,21	0,03	0,03	0,17	0,40	1,86	0,98	4,68
20-31	0,15	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,36	0,34	0,96
Somatório	20,47	32,34	25,73	21,84	17,85	17,22	22,41	35,82	23,54	217,20

Tab. 6.8. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a orientação das vertentes.

Espessura Mat. Inconsolidado	Orientação									Somatório
	(N)	(NE)	(E)	(SE)	(S)	(SW)	(W)	(NW)	(N)	
2,8-8,5	7	12	9	14	20	16	9	6	8	100
8,5-10	8	11	15	16	15	10	10	8	7	100
10,1-11,5	11	18	12	10	8	6	8	15	13	100
11,5-13	9	14	12	11	7	9	10	17	10	100
13-14,5	10	19	13	6	4	6	14	18	11	100
14,5-16	7	8	7	4	5	8	16	33	12	100
16-20	15	7	4	1	1	4	9	40	21	100
20-31	16	10	0	0	0	0	1	37	36	100
Somatório	82	97	71	62	59	60	77	174	116	800

Tab. 6.9. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura do material inconsolidado e a entropia do relevo.

Espessura Mat. Inconsolidado	Entropia					Somatório
	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	
2,8-8,5	0,00	1,54	2,46	1,30	1,93	7,23
8,5-10	0,03	3,84	5,76	4,54	3,59	17,76
10,1-11,5	2,83	11,64	13,00	11,21	12,41	51,10
11,5-13	7,03	10,23	12,59	12,89	16,46	59,20
13-14,5	1,06	3,47	9,84	9,41	9,23	33,01
14,5-16	0,00	0,88	2,32	3,34	3,54	10,08
16-20	0,00	0,50	1,91	0,94	1,33	4,68
20-31	0,00	0,02	0,11	0,10	0,79	1,02
Somatório	10,95	32,12	47,98	43,73	49,29	184,06

Tab. 6.10. Tabulação cruzada (em %) entre a espessura do material inconsolidado e a entropia do relevo.

Espessura Mat. Inconsolidado	Entropia					Somatório
	baixa	baixa à média	média	média à alta	alta	
2,8-8,5	0	21	34	18	27	100
8,5-10	0	22	32	26	20	100
10,1-11,5	6	23	25	22	24	100
11,5-13	12	17	21	22	28	100
13-14,5	3	11	30	29	28	100
14,5-16	0	9	23	33	35	100
16-20	0	11	41	20	28	100
20-31	0	2	10	10	78	100
Somatório	21	115	217	179	268	800

No que se refere às áreas das classes de espessura do material inconsolidado, em tabulação cruzada com os atributos do meio físico, é possível resumir as seguintes coincidências: quanto à geologia, pode-se destacar os granulitos paraderivados e os quartzitos

micáceos relacionados às menores espessuras (Tab. 6.11 e 6.12) e em quanto à geomorfologia, as maiores espessuras ao Planalto Embutido de Goiânia (c1, c2 e t) e aos Fundos de Vale (Tab. 6.13 e Tab. 6.14).

Tab. 6.11. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura do material inconsolidado e a geologia.

Espessura Mat. Inconsolidado	Geologia						
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	Somatório
2,8-8,5	1,12	2,53	0,01	0,28	0,14	7,38	11,44
8,5-10	0,69	6,95	0,00	0,52	0,12	23,56	31,83
10,1-11,5	1,53	25,89	6,72	0,34	0,25	39,41	74,13
11,5-13	3,57	15,66	12,27	0,18	0,00	39,38	71,06
13-14,5	4,59	9,88	0,60	0,09	0,00	27,32	42,48
14,5-16	0,35	3,01	0,01	0,03	0,00	9,98	13,38
16-20	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	4,68	5,28
20-31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	1,02
Somatório	11,84	64,52	19,61	1,43	0,51	152,72	250,62

Tab. 6.12. Tabulação cruzada (em %) entre a geologia e a espessura do material inconsolidado.

Espessura Mat. Inconsolidado	Geologia						
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	Somatório
2,8-8,5	9	4	0	19	27	5	64
8,5-10	6	11	0	36	23	15	91
10,1-11,5	13	40	34	24	50	26	187
11,5-13	30	24	63	12	0	26	155
13-14,5	39	15	3	6	0	18	81
14,5-16	3	5	0	2	0	7	16
16-20	0	1	0	0	0	3	4
20-31	0	0	0	0	0	1	1
Somatório	100	100	100	100	100	100	600

Tab. 6.13. Tabulação cruzada (em km²) entre a geomorfologia e a espessura dos materiais inconsolidados.

Espessura Mat. Inconsolidado	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
2,8-8,5	0,28	0,00	0,00	2,60	0,37	0,02	0,80	1,93	2,16	8,15
8,5-10	0,20	0,23	0,80	10,23	2,42	0,21	0,29	0,96	7,73	23,06
10,1-11,5	1,70	0,17	6,68	20,55	14,18	6,44	0,51	2,53	16,68	69,43
11,5-13	4,58	0,00	2,05	23,42	9,64	6,07	0,99	2,80	20,27	69,81
13-14,5	0,32	0,00	0,00	16,50	5,88	6,01	0,76	2,66	10,26	42,38
14,5-16	0,00	0,00	0,00	5,44	2,42	3,11	0,05	0,31	2,04	13,36
16-20	0,00	0,00	0,00	3,39	0,36	0,95	0,00	0,00	0,58	5,28
20-31	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	1,02
Somatório	7,07	0,40	9,53	83,13	35,26	22,82	3,40	11,18	59,72	232,49

Tab. 6.14. Tabulação cruzada (em km²) entre a espessura dos materiais inconsolidados e a geomorfologia.

Espessura Mat. Inconsolidado	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
2,8-8,5	3	0	0	32	4	0	10	24	26	100
8,5-10	1	1	3	44	10	1	1	4	34	100
10,1-11,5	2	0	10	30	20	9	1	4	24	100
11,5-13	7	0	3	34	14	9	1	4	29	100
13-14,5	1	0	0	39	14	14	2	6	24	100
14,5-16	0	0	0	41	18	23	0	2	15	100
16-20	0	0	0	64	7	18	0	0	11	100
20-31	0	0	0	99	0	0	0	0	1	100
Somatório	14	1	16	382	88	75	15	44	164	800

Foram construídos também perfis geológicos esquemáticos definidos segundo os alinhamentos que apresentaram maior quantidade e concentração de sondagens. São quatro perfis (Fig. 6.8, Fig. 6.9 e Fig. 6.10), dos quais três deles constam de um conjunto de dados de sondagens de reconhecimento, dados de sondagens mistas e de descrição de poços. O quarto perfil segue uma linha que também corta a área de estudos no sentido aproximadamente norte-sul, como no terceiro perfil, mas com alguns desvios, por ter sido elaborado com a finalidade de se comparar a morfometria com a delimitação dos horizontes de acordo com o comportamento da reta que representa a variação do índice Nspt com a profundidade. Na região central, como é possível também observar, a partir desses perfis geológicos elaborados, o aumento da espessura dos materiais inconsolidados é concordante com a ocorrência das quebras negativas.

Os valores relativos ao índice Nspt a cada metro de profundidade a partir da superfície foram modelados até a profundidade de 21m. Dessa modelagem foi possível observar que à medida que ocorre o aumento da profundidade, a modelagem apresenta os maiores valores na região centro sul, correspondente a rochas xistosas. Foram selecionados os níveis com profundidade de 4, 6, 11, 16 e 20 metros (Fig. 6.11 até Fig. 6.15), os quais se considera serem representativos do primeiro horizonte argiloso (4 e 6 metros) e do restante do perfil (11, 16 e 20 metros). São raras, das sondagens georreferenciadas na base de dados, as que apresentam amostras a partir dos 20 metros.

Em relação à modelagem à profundidade de 4 metros, os valores de resistência mais frequentes estão entre 2 e 7 golpes. Os maiores valores (entre 15 e 30 golpes) correspondem em geral ao horizonte argilo-arenoso com pedregulhos e a aluviões compostos por material arenoso a essa profundidade.

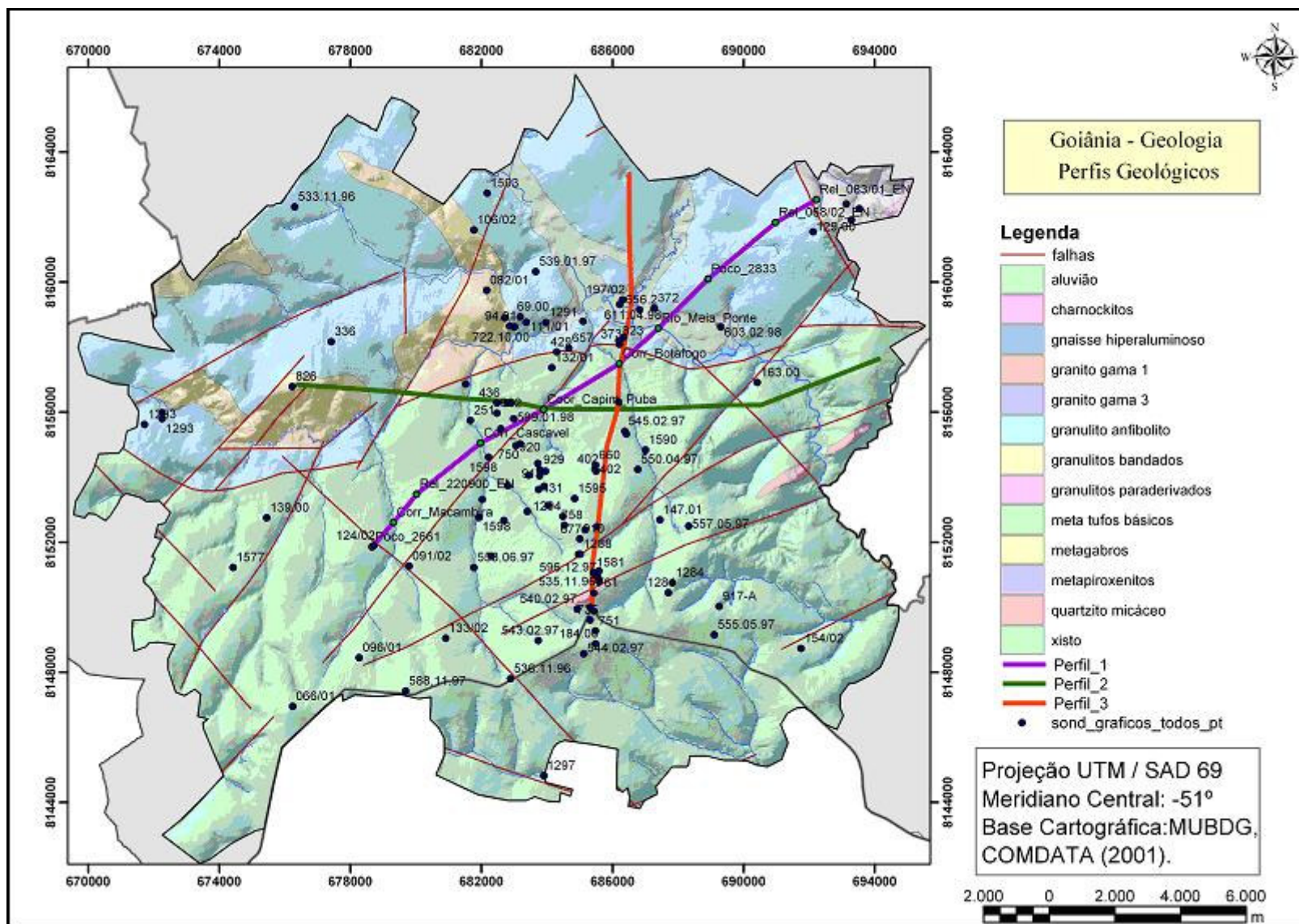


Figura 6.8. Mapa de documentação da localização dos perfis geológicos em relação às sondagens referentes aos gráficos elaborados e à geologia.

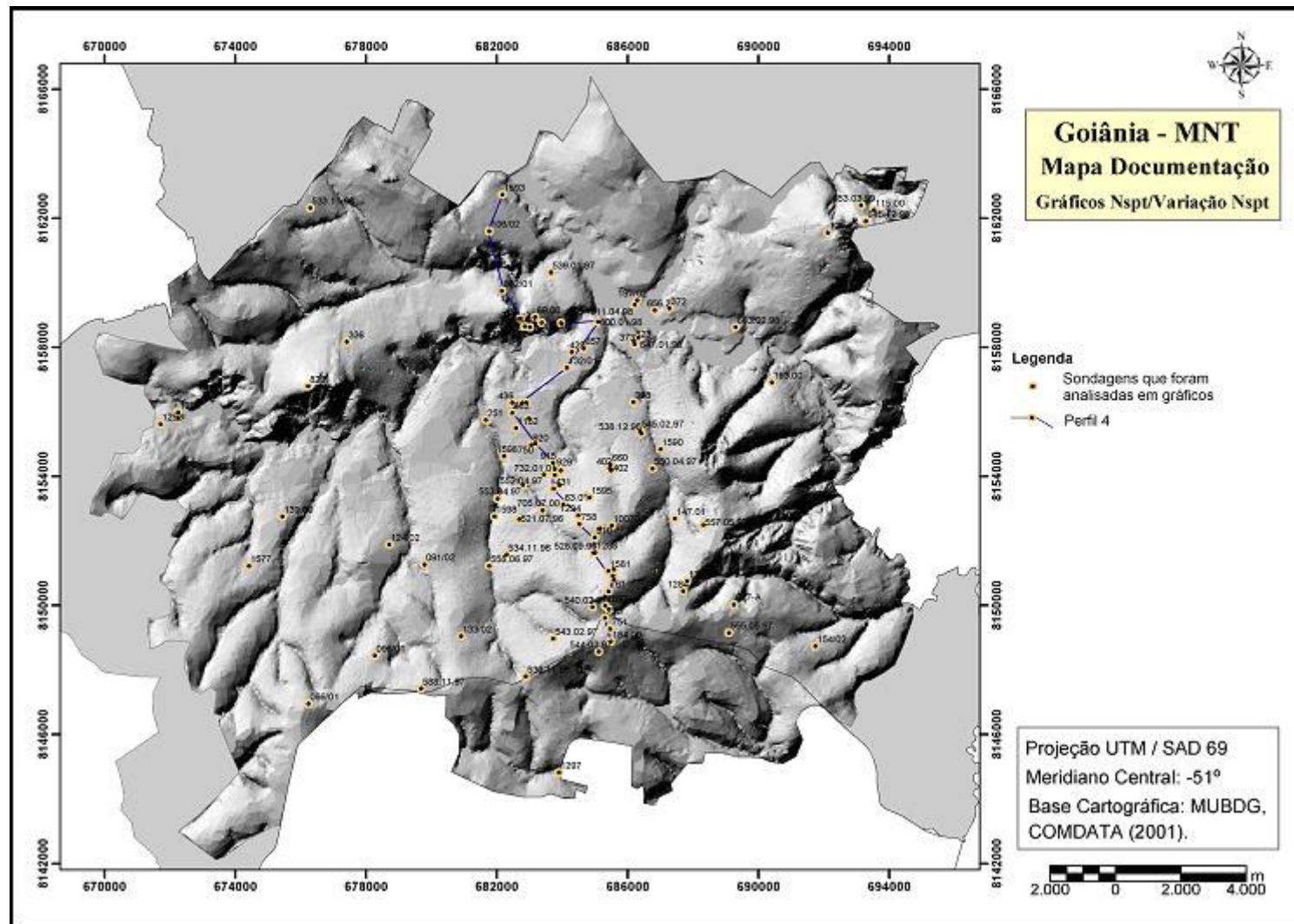


Figura 6.9. Localização dos furos de sondagem do tipo SPT, cujos gráficos de variação do índice Nspt com a profundidade foram elaborados e do perfil geológico de número quatro.

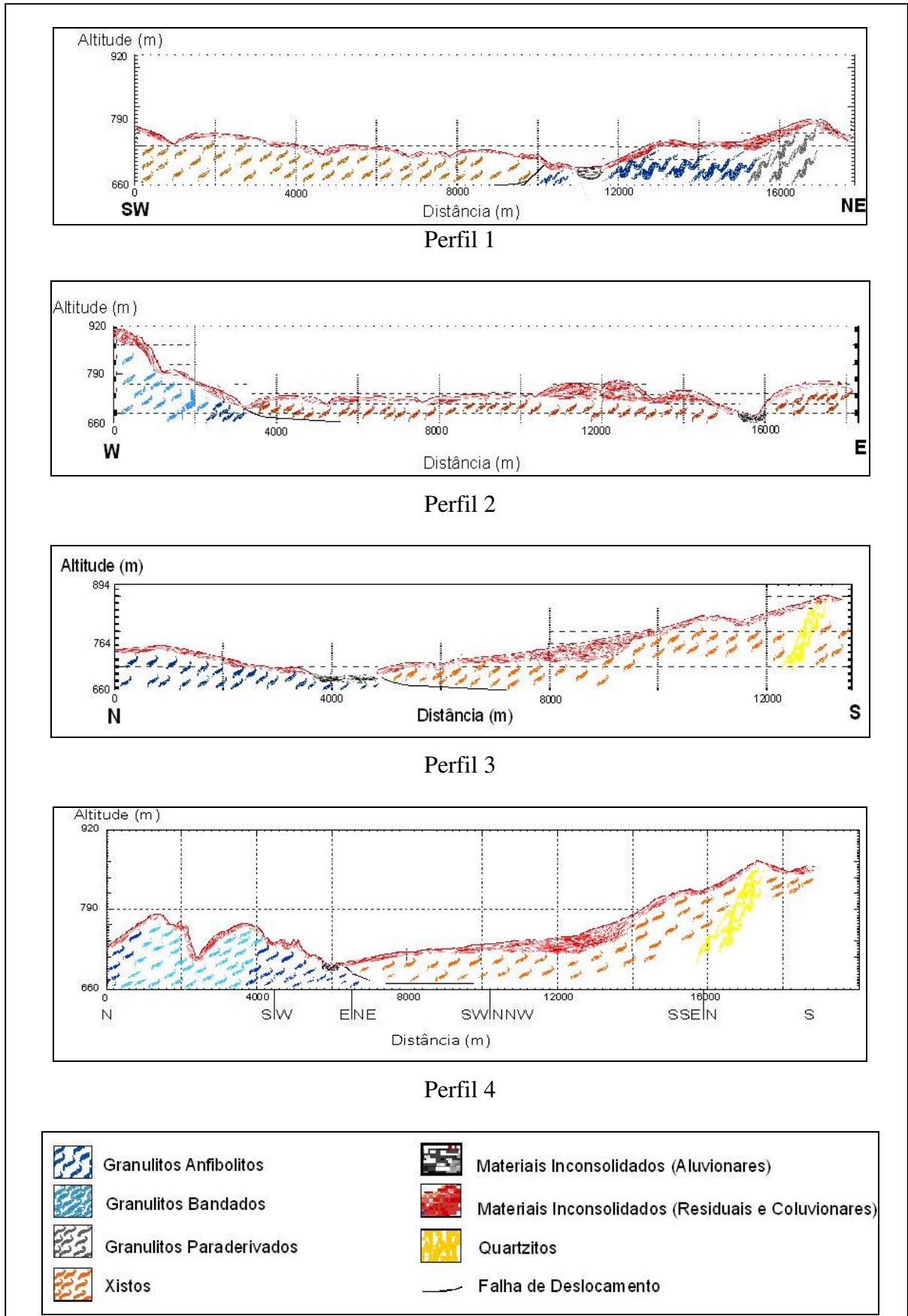


Figura 6.10. Perfis geológicos esquemáticos da área de estudos.

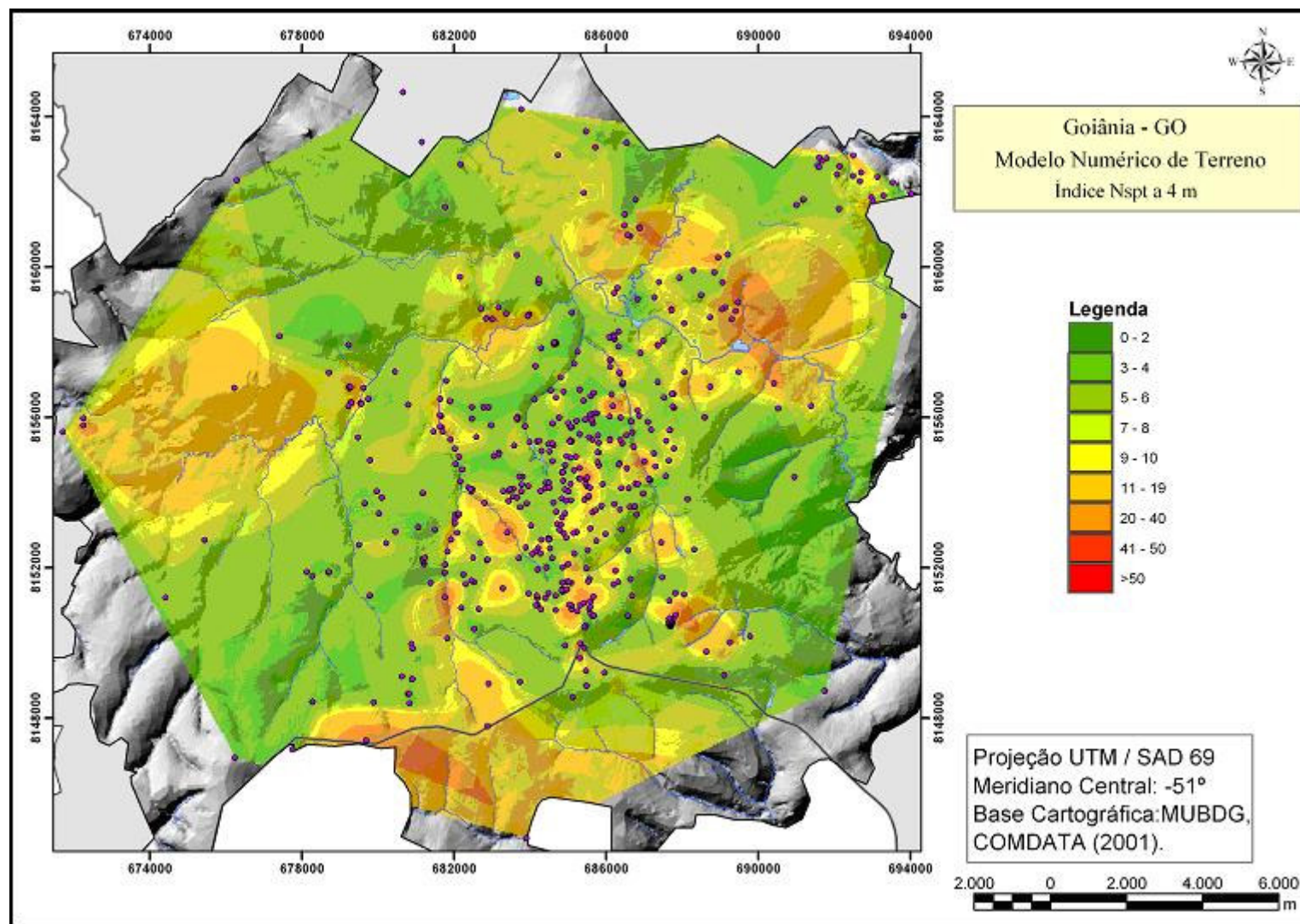


Figura 6.11. Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 4 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural.

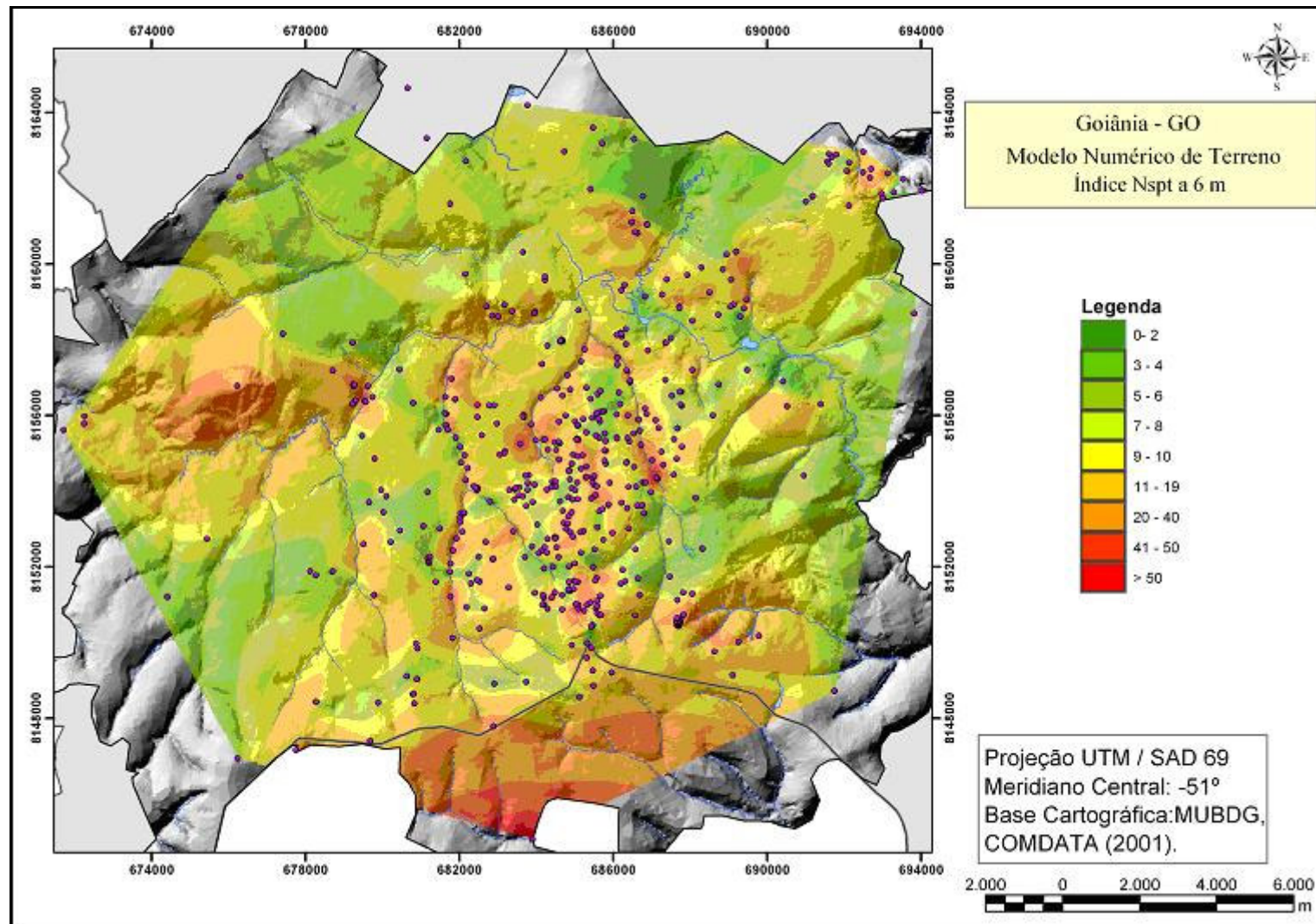


Figura 6.12. Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 6 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural.

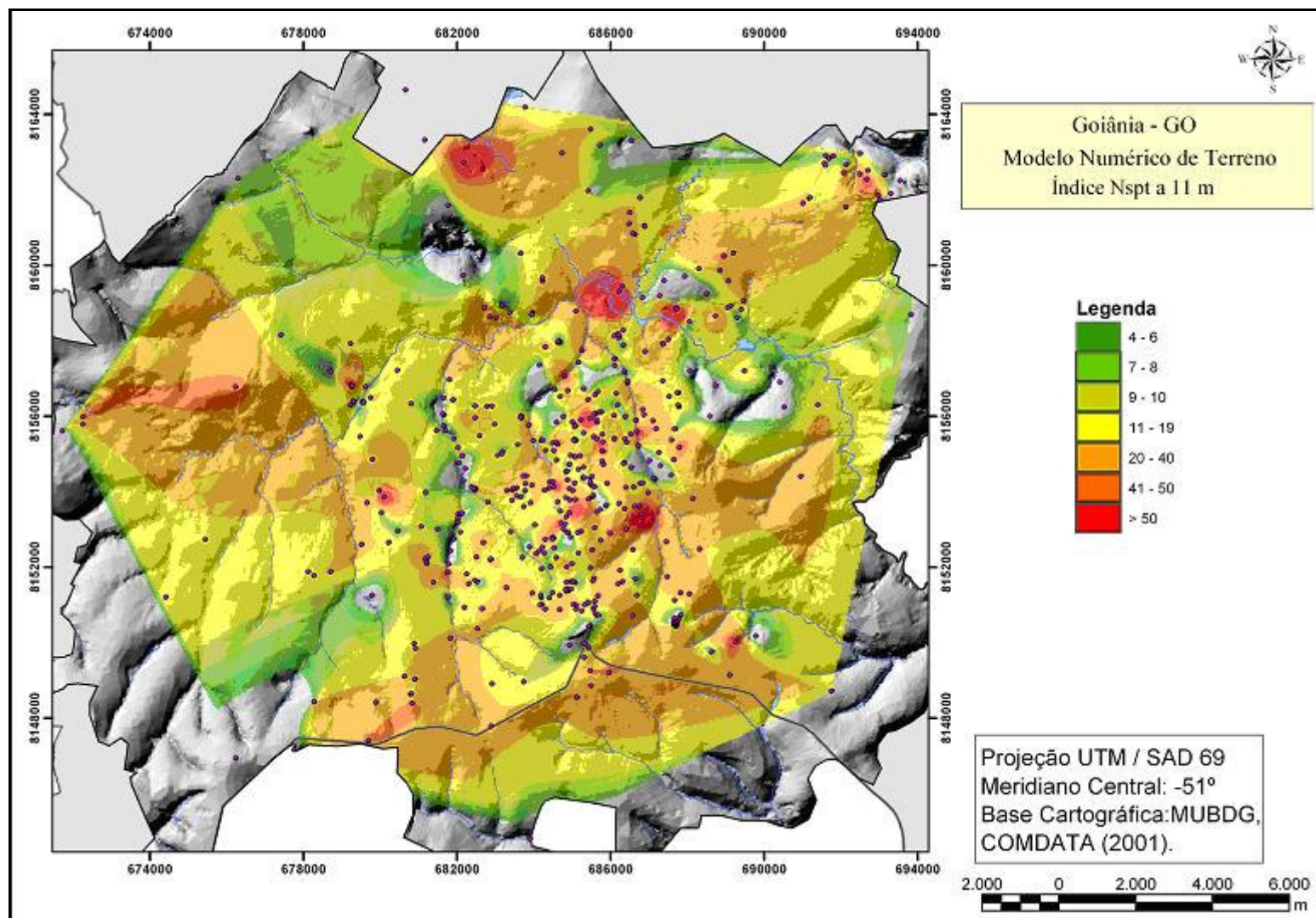


Figura 6.13. Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 11 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural. As áreas não classificadas se referem a sondagens que não atingiram os 11 metros.

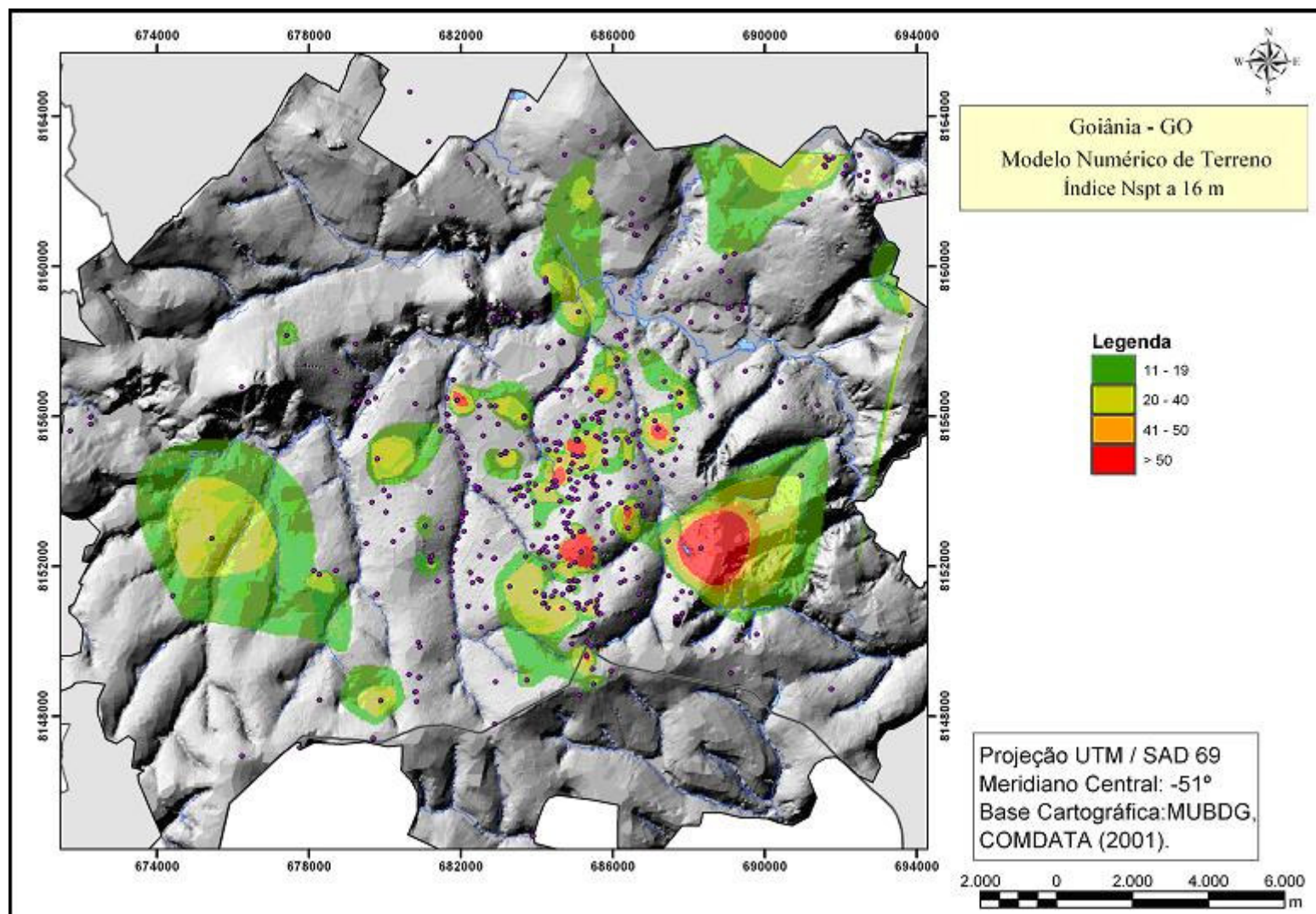


Figura 6.14. Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 16 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural. As áreas não classificadas se referem a sondagens que não atingiram os 16 metros.

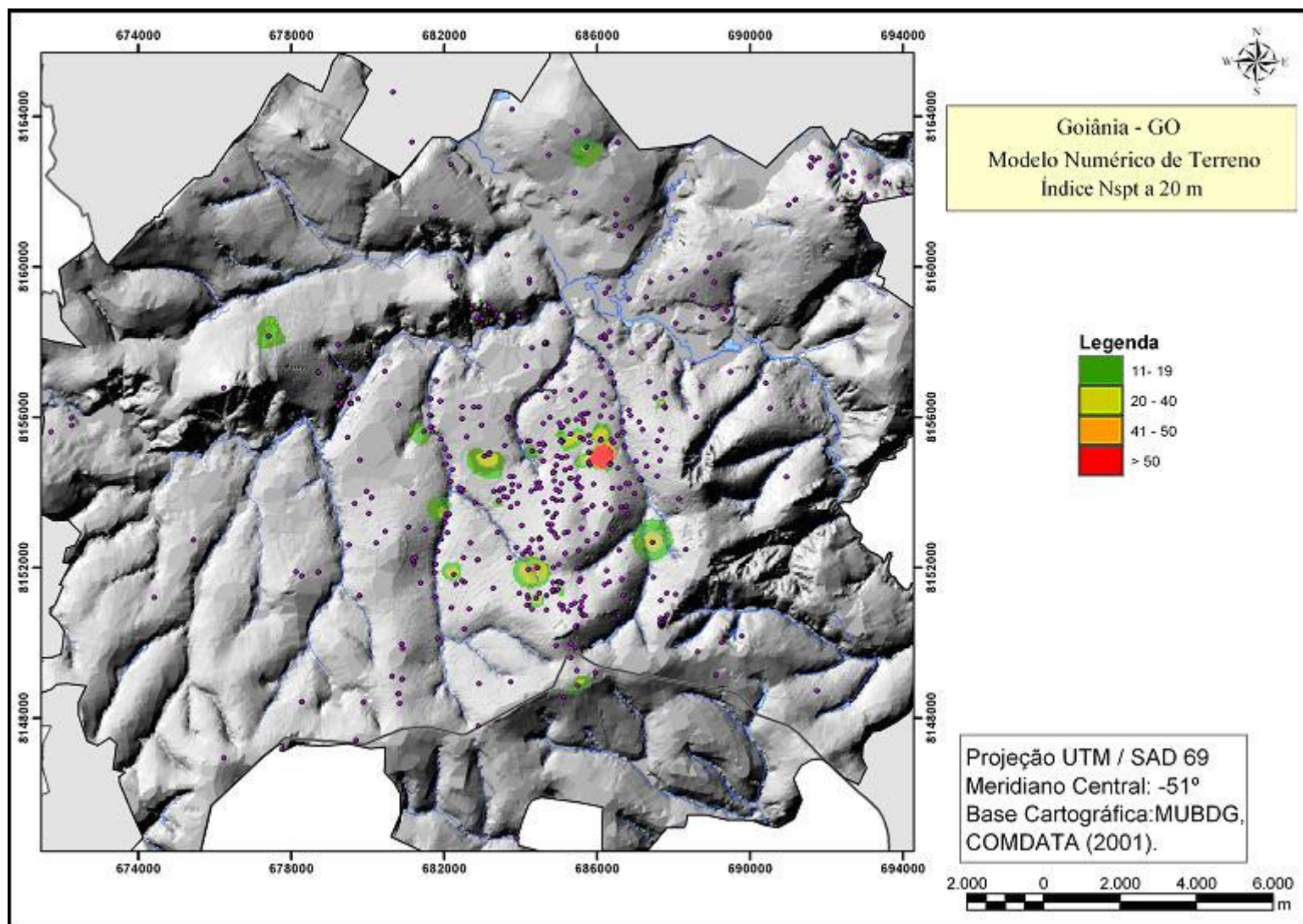


Figura 6.15. Modelo numérico de terreno representando os dados de sondagens à percussão (índice Nspt) a 20 m de profundidade, elaborado pelo método da vizinhança natural. As áreas não classificadas se referem a sondagens que não atingiram os 20 metros.

A divisão das classes na representação cartográfica dos valores relativos aos índices de resistência à penetração foi compatibilizada segundo a classificação que define índices para a compacidade ou consistência das areias e siltes arenosos ou das argilas e siltes argilosos, respectivamente.

Segundo observação das tabulações cruzadas entre o MNT, referente à espacialização do índice de resistência à penetração em profundidade, e os atributos morfométricos e do meio físico é possível destacar o que se segue. As tabulações que foram transcritas nesta seção do texto apresentaram somente as correlações mais expressivas em área, o restante não apresentou um padrão de ocorrência de destaque. Isso se deve parcialmente à modelagem dos valores, a qual depende da densidade dos pontos, novamente tendo sido levado em conta na análise, trechos de maior densidade de pontos.

Os maiores valores para a profundidade de 4 metros são comuns, quanto à curvatura do perfil (Tab. 6.15 e Tab. 6.16), em curvaturas convexas e à medida que os índices diminuem, relacionam-se às curvaturas côncavas e convexas quase em quantidades equivalentes.

Tab. 6.15. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e de curvaturas do perfil.

Índice Nspt a 4m	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
0-2	0,17	0,00	0,15	0,32
2-4	19,62	0,89	31,09	51,60
4-6	37,53	1,21	57,72	96,46
6-8	21,82	1,54	29,69	53,05
8-10	11,32	1,02	15,26	27,60
10-20	22,62	1,30	23,68	47,60
20-40	2,45	0,21	3,71	6,37
40-50	0,01	0,00	0,04	0,05
>50	0,00	0,00	0,01	0,01
Somatório	115,54	6,17	161,35	283,06

A tabulação cruzada (Tab. 6.17 e Tab. 6.18) entre as classes de índices Nspt e as de geologia mostraram uma predominância de rochas xistosas e de granulitos anfibolitos nas áreas correspondentes aos maiores índices e de aluviões, granulitos paraderivados, quartzito micáceo e também rochas xistosas associados aos menores índices.

Tab. 6.16. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as curvaturas do perfil.

Índice Nspt a 4m	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
0-2	53	0	47	100
2-4	38	2	60	100
4-6	39	1	60	100
6-8	41	3	56	100
8-10	41	4	55	100
10-20	48	3	50	100
20-40	38	3	58	100
40-50	20	0	80	100
>50	0	0	100	100
Somatório	318	16	566	900

Tab. 6.17. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de geologia.

Índice Nspt a 4m	Geologia						Somatório
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	
0-2	0,09	0,01	0,03	0,07	0,05	0,08	0,32
2-4	0,33	6,11	1,82	0,09	0,83	42,74	51,92
4-6	1,87	30,82	5,69	0,29	0,13	61,45	100,24
6-8	4,82	18,43	4,49	0,75	0,10	30,16	58,75
8-10	2,37	11,18	1,56	0,42	0,05	15,38	30,96
10-20	2,27	20,68	8,88	0,23	0,03	26,66	58,75
20-40	1,07	2,54	0,01	0,00	0,00	5,15	8,77
40-50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05
>50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Somatório	12,81	89,77	22,47	1,84	1,19	181,67	309,74

Tab. 6.18. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de geologia.

Índice Nspt a 4m	Geologia						Somatório
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	
0-2	29	2	9	21	16	24	100
2-4	1	12	3	0	2	82	100
4-6	2	31	6	0	0	61	100
6-8	8	31	8	1	0	51	100
8-10	8	36	5	1	0	50	100
10-20	4	35	15	0	0	45	100
20-40	12	29	0	0	0	59	100
40-50	0	0	0	0	0	100	100
>50	0	0	0	0	0	100	100
Somatório	63	176	46	24	18	573	900

Da Tab. 6.19 e da Tab. 6.20 é possível destacar a predominância nas áreas dos maiores índices do Planalto Embutido de Goiânia (c1 e c2), Fundos de Vale e Planícies fluviais. E quanto aos intervalos de Nspt a 4m com as classes de solo presentes na área (Tab. 6.21 e Tab. 6.22), as classes de Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho, Neossolo Flúvico e Gleissolo e Nitossolo Vermelho coincidem com os menores índices.

Tab. 6.19. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de geomorfologia.

Índice Nspt a 4m	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
0-2	0,07	0,00	0,00	0,15	0,00	0,01	0,00	0,09	0,01	0,32
2-4	0,07	0,15	0,23	19,72	10,65	5,20	0,00	0,43	15,42	51,86
4-6	0,15	0,55	2,04	35,36	21,76	11,05	0,07	2,94	23,37	97,28
6-8	0,59	0,27	1,52	15,90	11,97	4,80	0,76	3,21	14,65	53,66
8-10	0,78	0,00	1,62	8,36	4,97	1,19	0,44	2,09	8,23	27,65
10-20	6,53	0,00	5,72	11,47	6,16	1,04	1,54	2,66	12,84	47,96
20-40	0,00	0,00	0,15	1,88	0,29	0,09	0,66	1,33	2,07	6,46
40-50	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
>50	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Somatório	8,18	0,97	11,29	92,85	55,81	23,36	3,46	12,75	76,59	285,24

Tab. 6.20. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de geomorfologia.

Índice Nspt a 4m	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
0-2	21	0	0	46	0	2	0	29	3	100
2-4	0	0	0	38	21	10	0	1	30	100
4-6	0	1	2	36	22	11	0	3	24	100
6-8	1	0	3	30	22	9	1	6	27	100
8-10	3	0	6	30	18	4	2	8	30	100
10-20	14	0	12	24	13	2	3	6	27	100
20-40	0	0	2	29	4	1	10	21	32	100
40-50	0	0	0	44	56	0	0	0	0	100
>50	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
Somatório	39	1	25	377	156	40	16	72	173	900

Para a profundidade de 6 metros, os valores em relação à resistência à penetração estão entre 4 e 19 golpes. Os maiores índices ocorrem no Planalto Embutido de Goiânia (c1 e c2) e nos Fundos de Vale. Em superfície, os trechos correspondentes ao impenetrável para a profundidade de 6 metros ocorrem principalmente sobre rochas xistosas. As modelagens a 11, 16 e 20 metros de profundidade apresentaram quantidades expressivas de vazios correspondentes à ausência de valores medidos. A frequência de valores a 11 metros é maior

no intervalo entre 9 e 40 golpes, a 16 e 20 metros essa frequência é maior entre 11 e 40 golpes.

Tab. 6.21. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de solos.

Índice Nspt a 4m	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
0-2	0,00	0,17	0,09	0,00	0,07	0,32
2-4	7,32	42,84	0,88	0,72	0,17	51,92
4-6	4,13	90,05	4,06	1,27	0,73	100,24
6-8	0,58	49,86	6,08	0,40	1,84	58,75
8-10	0,30	27,19	2,78	0,21	0,48	30,96
10-20	0,75	47,43	4,53	5,80	0,25	58,75
20-40	0,09	7,03	1,63	0,00	0,03	8,77
40-50	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,05
>50	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Somatório	13,15	264,60	20,04	8,39	3,55	309,74

Tab. 6.22. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 4m e as classes de solos.

Índice Nspt a 4m	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
0-2	0	51	28	0	21	100
2-4	14	83	2	1	0	100
4-6	4	90	4	1	1	100
6-8	1	85	10	1	3	100
8-10	1	88	9	1	2	100
10-20	1	81	8	10	0	100
20-40	1	80	19	0	0	100
40-50	0	100	0	0	0	100
>50	0	100	0	0	0	100
Somatório	22	757	79	14	27	900

As tabulações cruzadas, realizadas entre as classes de curvatura do perfil e dos atributos do meio físico, que mostraram áreas coincidentes com classes de intervalos de índices Nspt a profundidades de 11 e 16 metros, são apresentadas desde a Tab. 6.23 até a Tab. 6.38. Em relação à curvatura do perfil e os intervalos dos índices a 11 e 16 metros (Tab. 6.23, Tab. 6.24, Tab. 6.25 e Tab. 6.26), ocorre a predominância de curvaturas convexas para os intervalos, exceto para os maiores valores que também ocorrem em curvaturas côncavas e retilíneas. Quanto à geologia, os menores índices Nspt tanto a profundidades de 11 quanto de 16 metros coincidem em maior porcentagem de área com as rochas xistosas e com os granulitos anfíbolitos (Tab. 6.27, Tab. 6.28, Tab. 6.29 e Tab. 6.30)

Tab. 6.23. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de curvatura do perfil.

Índice Nspt a 11m	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
4-6	5,74	0,19	8,65	14,58
6-8	9,69	0,50	12,64	22,83
8-10	13,57	1,15	19,65	34,37
10-19	41,14	1,94	59,50	102,58
19-40	37,43	1,10	51,16	89,69
40-50	3,38	0,49	3,47	7,34
>50	1,42	0,71	1,15	3,28
Somatório	112,37	6,08	156,22	274,67

Tab. 6.24. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de curvatura do perfil.

Índice Nspt a 11m	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
4-6	39	1	59	100
6-8	42	2	55	100
8-10	39	3	57	100
10-19	40	2	58	100
19-40	42	1	57	100
40-50	46	7	47	100
>50	43	22	35	100
Somatório	292	38	369	700

Tab. 6.25. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de curvatura do perfil.

Índice Nspt a 16m	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
11-19	16,60	1,17	20,70	38,47
19-40	8,85	0,51	13,81	23,17
40-50	0,59	0,00	1,22	1,81
> 50	1,18	0,06	2,83	4,07
Somatório	27,22	1,74	38,56	67,52

Tab. 6.26. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de curvatura do perfil.

Índice Nspt a 16m	Curvatura do Perfil			
	Côncava	Retilínea	Convexa	Somatório
11-19	43	3	54	100
19-40	38	2	60	100
40-50	33	0	67	100
> 50	29	1	70	100
Somatório	143	7	250	400

Tab. 6.27. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geologia.

Índice Nspt a 11m	Geologia						Somatório
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	
4-6	0,32	4,39	1,13	0,09	0,12	9,58	15,62
6-8	0,54	9,60	1,06	0,13	0,11	12,85	24,28
8-10	2,87	18,13	1,85	0,18	0,05	12,85	35,93
10-19	3,95	27,41	6,39	0,53	0,31	73,20	111,79
19-40	2,91	27,19	8,78	0,41	0,52	61,92	101,73
40-50	1,02	2,07	1,66	0,18	0,00	2,71	7,64
>50	1,16	1,12	0,00	0,07	0,00	0,98	3,32
Somatório	12,75	89,91	20,87	1,58	1,11	174,09	300,30

Tab. 6.28. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geologia.

Índice Nspt a 11m	Geologia						Somatório
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	
4-6	2	28	7	1	1	61	100
6-8	2	40	4	1	0	53	100
8-10	8	50	5	0	0	36	100
10-19	4	25	6	0	0	65	100
19-40	3	27	9	0	1	61	100
40-50	13	27	22	2	0	35	100
>50	35	34	0	2	0	29	100
Somatório	67	230	53	7	2	341	700

Tab. 6.29. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geologia.

Índice Nspt a 16m	Geologia						Somatório
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	
11-19	2,59	9,57	0,79	0,17	0,33	25,26	38,70
19-40	0,53	3,79	0,00	0,02	0,14	18,85	23,33
40-50	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	1,87	1,90
> 50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16	4,16
Somatório	3,12	13,39	0,79	0,19	0,46	50,13	68,08

Tab. 6.30. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geologia.

Índice Nspt a 16m	Geologia						Somatório
	aluvião	gran. anfib.	gran. band.	gran. parad.	quartz. mic.	xisto	
11-19	7	25	2	0	1	65	100
19-40	2	16	0	0	1	81	100
40-50	0	2	0	0	0	98	100
> 50	0	0	0	0	0	100	100
Somatório	9	43	2	1	1	344	400

Ao se observar a tabulação cruzada em relação às áreas das classes de intervalos de índices Nspt a 11 e a 16 metros e as de geomorfologia (Tab. 6.31, Tab. 6.32, Tab. 6.33 e Tab. 6.34), destacam-se as correlações dos menores índices Nspt ao Planalto Embutido de Goiânia (c1) e aos Fundos de Vale.

Tab. 6.31. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geomorfologia.

Índice Nspt a 11m	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
4-6	0,08	0,11	0,31	5,82	2,59	0,70	0,17	0,50	4,35	14,62
6-8	0,08	0,11	0,30	7,71	5,90	1,30	0,27	1,11	6,04	22,81
8-10	0,06	0,08	0,35	7,77	10,69	3,36	1,25	2,55	8,40	34,51
10-19	0,44	0,56	4,96	34,89	17,46	11,45	0,58	5,10	27,81	103,24
19-40	5,70	0,00	5,04	30,76	16,35	6,14	0,61	1,88	23,91	90,38
40-50	1,52	0,00	0,05	1,91	1,31	0,11	0,19	0,76	1,65	7,51
>50	0,04	0,00	0,00	1,02	0,28	0,05	0,21	0,77	0,95	3,32
Somatório	7,91	0,85	11,00	89,88	54,58	23,10	3,28	12,68	73,11	276,38

Tab. 6.32. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de geomorfologia.

Índice Nspt a 11m	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
4-6	1	1	2	40	18	5	1	3	30	100
6-8	0	0	1	34	26	6	1	5	26	100
8-10	0	0	1	23	31	10	4	7	24	100
10-19	0	1	5	34	17	11	1	5	27	100
19-40	6	0	6	34	18	7	1	2	26	100
40-50	20	0	1	25	17	1	3	10	22	100
>50	1	0	0	31	9	2	6	23	29	100
Somatório	29	2	16	220	136	41	16	56	185	700

Tab. 6.33. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geomorfologia.

Índice Nspt a 16m	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
11-19	0,04	0,37	3,27	14,43	2,99	3,45	0,47	1,48	11,96	38,46
19-40	0,00	0,01	3,73	7,09	3,84	2,25	0,00	0,06	6,17	23,15
40-50	0,00	0,00	0,00	0,49	0,63	0,05	0,00	0,00	0,72	1,88
> 50	0,00	0,00	0,00	1,15	2,21	0,11	0,00	0,00	0,66	4,12
Somatório	0,04	0,38	7,00	23,16	9,67	5,86	0,47	1,54	19,50	67,61

Tab. 6.34. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de geomorfologia.

Índice Nspt a 16m	Geomorfologia									
	PDG_a4	CG_A	CG_R	PEG_c1	PEG_c2	PEG_t	Tf	Pf	FV	Somatório
11-19	0	1	9	38	8	9	1	4	31	100
19-40	0	0	16	31	17	10	0	0	27	100
40-50	0	0	0	26	33	3	0	0	38	100
> 50	0	0	0	28	54	3	0	0	16	100
Somatório	0	1	25	122	111	24	1	4	112	400

Em relação à tabulação cruzada entre as áreas das classes de intervalos de índices Nspt a 11 metros e as de solos (Tab. 6.35 e Tab. 6.36) predominam as coincidências entre as classes referentes aos maiores índices com classes de solos do tipo Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico e Gleissolo e os intervalos de índices a 16 metros (Tab. 6.37 e Tab. 6.38) também se correlacionam ao Latossolo Vermelho em menor proporção ao Cambissolo Háptico.

Tab. 6.35. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de solos.

Índice Nspt a 11m	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
4-6	0,13	14,05	0,77	0,45	0,23	15,62
6-8	0,29	21,55	1,77	0,28	0,39	24,28
8-10	0,49	29,53	5,32	0,33	0,27	35,93
10-19	9,24	95,08	5,89	0,47	1,11	111,79
19-40	2,93	90,65	3,24	3,84	1,07	101,73
40-50	0,01	3,82	1,36	2,27	0,18	7,64
>50	0,01	1,61	1,64	0,00	0,07	3,32
Somatório	13,09	256,28	19,99	7,64	3,30	300,30

Tab. 6.36. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 11m e as classes de solos.

Índice Nspt a 11m	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
4-6	1	90	5	3	1	100
6-8	1	89	7	1	2	100
8-10	1	82	15	1	1	100
10-19	8	85	5	0	1	100
19-40	3	89	3	4	1	100
40-50	0	50	18	30	2	100
>50	0	49	49	0	2	100
Somatório	15	534	103	39	10	700

Tab. 6.37. Tabulação cruzada (em km²) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de solos.

Índice	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
11-19	1,92	32,90	3,14	0,25	0,50	38,70
19-40	2,17	20,22	0,78	0,02	0,15	23,33
40-50	0,63	1,27	0,00	0,00	0,00	1,90
> 50	0,61	3,55	0,00	0,00	0,00	4,16
Somatório	5,32	57,93	3,92	0,27	0,65	68,08

Tab. 6.38. Tabulação cruzada (em %) entre os intervalos de índices Nspt a 16m e as classes de solos.

Índice	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
11-19	5	85	8	1	1	100
19-40	9	87	3	0	1	100
40-50	33	67	0	0	0	100
> 50	15	85	0	0	0	100
Somatório	62	324	11	1	2	400

Para o entendimento da distribuição em planta da profundidade do nível d'água na área de estudos, consultas ao banco de dados apresentaram na estação seca, considerada como sendo de abril a setembro (Fig. 6.16), maiores profundidades e uma extensão maior em planta comparando-se à estação chuvosa (Fig. 6.17). Como já destacado anteriormente, as avaliações para essas análises e outras anteriores se concentraram na região de maior densidade de pontos.

Para o entendimento da modelagem das profundidades do nível d'água foram também realizadas tabulações cruzadas entre as classes de profundidade e os atributos morfométricos e do meio físico. As correlações em área que se mostraram expressivas consistiram nas tabulações com os intervalos de altitudes e com as classes de solo. Da Tab. 6. 39 até a Tab. 6.46 são apresentadas tais tabulações cruzadas. Pode-se destacar as principais coincidências em área: as menores profundidades do nível d'água na estação chuvosa (de outubro a março) e na estação seca (de abril a setembro) com as menores altitudes, com menor extensão em área para a estação seca em relação às menores profundidades (Tab. 6.39, Tab. 6.40, Tab. 6.41 e Tab. 6.42); e as menores profundidades relacionadas primeiramente aos solos do tipo Latossolo Vermelho e em menor proporção ao Neossolo Flúvico e Gleissolo, apresentando um aumento da profundidade relativa para esses últimos na estação seca (Tab. 6.43, Tab. 6.44, Tab. 6.45 e Tab. 6.46).

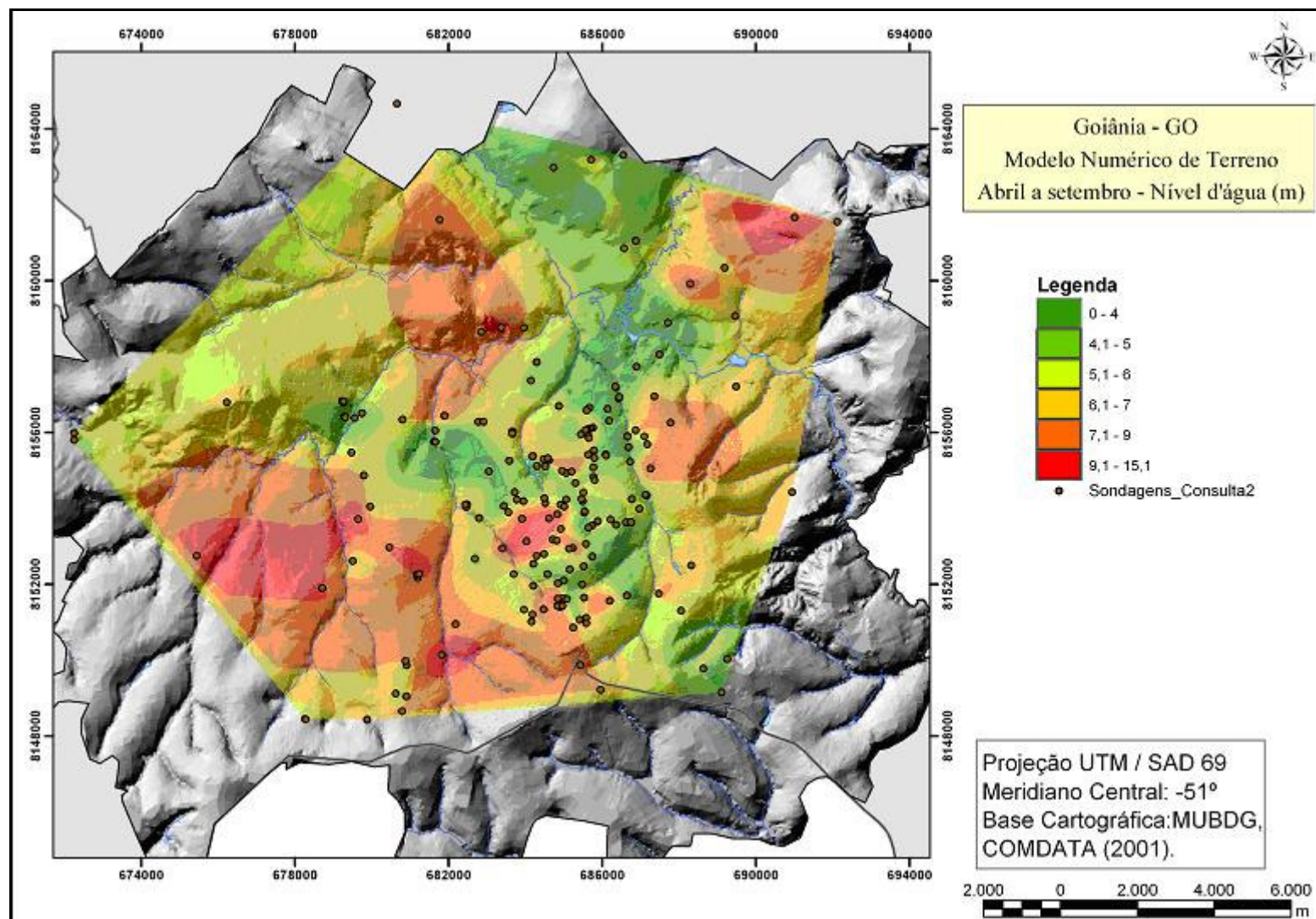


Figura 6.16. Profundidade do nível d'água a partir da superfície do terreno para a estação seca (aquífero poroso). Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.

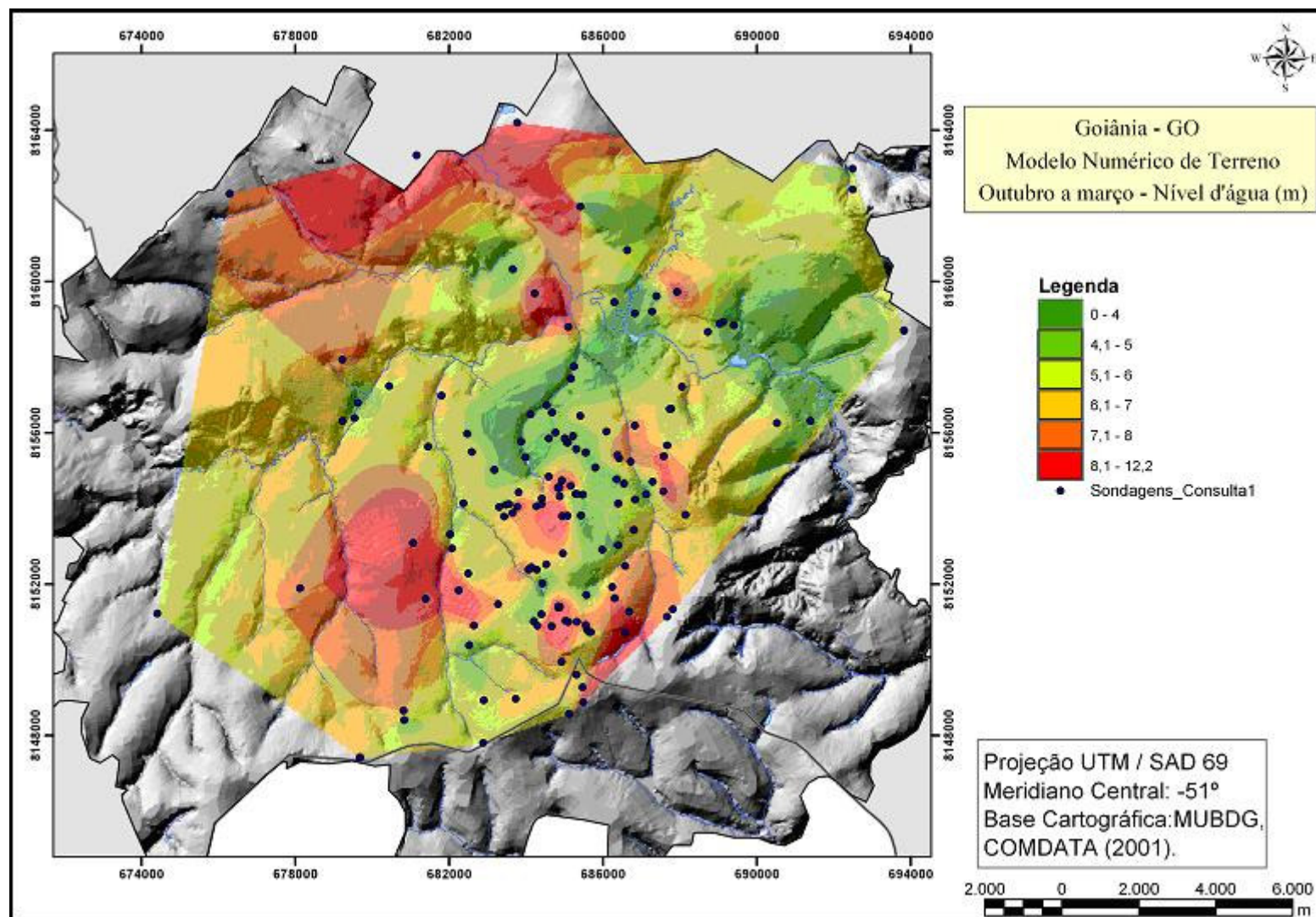


Figura 6.17. Profundidade do nível d'água a partir da superfície do terreno para a estação chuvosa (aqüífero poroso). Modelagem realizada segundo o método da vizinhança natural.

Tab. 6.39. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de intervalos de profundidade do nível d'água (estação chuvosa) e de intervalos de altitudes.

Nível d'água out - mar	Altitudes					Somatório
	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
0-4	13,13	5,31	1,02	0,47	0,00	19,91
4-5	6,87	9,80	2,92	1,92	0,17	21,67
5-6	15,52	23,60	12,88	6,56	1,54	60,08
6-7	9,15	18,70	17,69	10,38	3,39	59,30
7-8	3,64	13,12	15,35	6,00	0,92	39,02
8-12	5,24	7,15	10,22	3,91	0,70	27,22
Somatório	53,54	77,66	60,07	29,23	6,71	227,20

Tab. 6.40. Tabulação cruzada (em %) entre as classes de intervalos de profundidade do nível d'água (estação chuvosa) e de intervalos de altitudes.

Nível d'água out - mar	Altitudes					Somatório
	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
0-4	66	27	5	2	0	100
4-5	32	45	13	9	1	100
5-6	26	39	21	11	3	100
6-7	15	32	30	17	6	100
7-8	9	34	39	15	2	100
8-12	19	26	38	14	3	100
Somatório	167	203	147	69	14	600

Tab. 6.41. Tabulação cruzada (em km²) entre as classes de intervalos de profundidade do nível d'água (estação seca) e de intervalos de altitudes.

Nível d'água abr-set	Altitudes					Somatório
	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
0-4	9,84	8,51	0,35	0,68	0,01	19,40
4-5	10,28	7,60	3,93	3,34	0,02	25,17
5-6	9,14	11,60	16,99	12,04	0,95	50,72
6-7	11,77	20,93	11,71	9,76	1,72	55,88
7-9	6,78	22,57	20,77	6,11	1,87	58,09
9-15	0,49	6,11	6,38	0,11	0,00	13,09
Somatório	48,30	77,32	60,13	32,03	4,56	222,33

Tab. 6.42. Tabulação cruzada (em %) entre profundidades do NA (abril-setembro) e altitudes.

Nível d'água abr-set	Altitudes					Somatório
	675-726	726-764	764-803	803-842	842-910	
0-4	51	44	2	4	0	100
4-5	41	30	16	13	0	100
5-6	18	23	34	24	2	100
6-7	21	37	21	17	3	100
7-9	12	39	36	11	3	100
9-15	4	47	49	1	0	100
Somatório	146	220	156	69	8	600

Tab. 6.43. Tabulação cruzada (em km²) entre profundidades do NA (estação chuvosa) e solos.

Nível d'água out - mar	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúv. e Gleis.	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
0-4	0,11	15,62	4,19	0,00	0,00	19,91
4-5	0,08	19,90	1,50	0,13	0,08	21,67
5-6	0,46	52,61	3,55	0,68	2,77	60,08
6-7	0,46	51,98	3,56	3,20	0,11	59,29
7-8	0,00	34,91	3,79	0,32	0,00	39,02
8-12	0,00	24,42	2,79	0,01	0,00	27,22
Somatório	1,10	199,43	19,38	4,33	2,95	227,20

Tab. 6.44. Tabulação cruzada (em %) entre profundidades do NA (estação chuvosa) e solos.

Nível d'água out - mar	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúv. e Gleis.	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
0-4	1	78	21	0	0	100
4-5	0	92	7	1	0	100
5-6	1	88	6	1	5	100
6-7	1	88	6	5	0	100
7-8	0	89	10	1	0	100
8-12	0	90	10	0	0	100
Somatório	2	525	60	8	5	600

Tab. 6.45. Tabulação cruzada (em km²) entre profundidades do NA (estação seca) e solos.

Nível d'água abr-set	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúv. e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
0-4	0,00	15,66	3,73	0,00	0,00	19,40
4-5	1,38	18,12	5,64	0,00	0,03	25,16
5-6	1,41	41,31	5,62	2,35	0,03	50,72
6-7	1,13	48,26	3,31	3,15	0,04	55,88
7-9	0,00	54,53	0,16	1,91	1,48	58,08
9-15	0,00	12,84	0,00	0,00	0,20	13,04
Somatório	3,92	190,71	18,46	7,41	1,78	222,27

Tab. 6.46. Tabulação cruzada (em %) entre profundidades do NA (estação seca) e solos.

Nível d'água abr-set	Solos					
	Camb. Háptico	LV	Neos. Flúvico e Gleissolo	Neos. Litólico	Nitos. Vermelho	Somatório
0-4	0	81	19	0	0	100
4-5	5	72	22	0	0	100
5-6	3	81	11	5	0	100
6-7	2	86	6	6	0	100
7-9	0	94	0	3	3	100
9-15	0	98	0	0	2	100
Somatório	10	513	59	14	4	600

O princípio de que a entropia do relevo está correlacionada ao potencial de perda de solo mostrou-se verdadeiro ao se observar a localização das erosões descritas por Nascimento

& Sales (2003), as quais fazem parte do banco de dados georreferenciados. A Fig. 6.18 mostra relação, a partir dessa figura é possível afirmar que a maioria da ocorrência dos focos erosivos está situada em locais de média à alta entropia.

Da Fig. 6.19 até a Fig.6.22 são apresentados alguns dos perfis individuais representativos de sondagens dos valores de penetração por profundidade. Foram elaborados gráficos dos índices SPT e de sua variação; dos valores médios a cada duas medidas e de sua variação; e dos valores médios a cada três medidas e de sua variação de acordo com a profundidade. A finalidade da elaboração desses gráficos foi avaliar o comportamento do solo a partir da análise da inclinação (variação) da reta formada pelos pontos de valores de consistência e compacidade em profundidade (Nspt). A inclinação da reta com a profundidade tende a ter um valor constante para um perfil de solo homogêneo, ou de uma só camada. Os valores de consistência e compacidade tendem a aumentar com a profundidade em uma relação direta para um material homogêneo. Assim, foram analisados 104 pontos distribuídos na área de estudos, os quais se referem aos gráficos elaborados para a análise da inclinação da reta relacionada à variação do índice Nspt com a profundidade.

Os gráficos da Fig.6.19 apresentam um comportamento típico de perfil em que a sondagem não atinge camadas com valores de índices Nspt maiores que 50 golpes, mas avança até profundidades maiores que 20 m a partir da superfície.

Com relação aos atributos morfométricos, a sondagem relativa ao gráfico da Fig. 6.19 localiza-se em região plana (declividade de 1 a 3%), de baixa entropia, em vertente de curvaturas convexo-convexas. Em relação às outras sondagens, a variação dos valores médios nessa sondagem não é expressiva (entre 4 e -6), com exceção da profundidade onde ocorre uma intercalação de material argiloso com fragmentos de rocha intemperizada (entre 9 e 10 metros).

Para o perfil da sondagem da Fig. 6.20 a variação dos valores médios é ainda menor (entre 4 e -3), localizando-se em regiões de baixa a média entropia, correspondendo àquela região descrita como possuindo espessuras maiores de material inconsolidado, em regiões de existência de quebras negativas do relevo (declividade passando da classe de 1-3% para 3-7%), em curvaturas côncavo-côncavas. Tanto o perfil da Fig. 6.19 quanto o da Fig. 6.20 situam-se em região de rochas xistosas, e correspondem desde a superfície à camada argilosa sobre material siltoso, em que a variação maior dos valores de Nspt com a profundidade, na Fig.6.19, deve-se à presença de intercalação de argila com pedregulhos de quartzo.

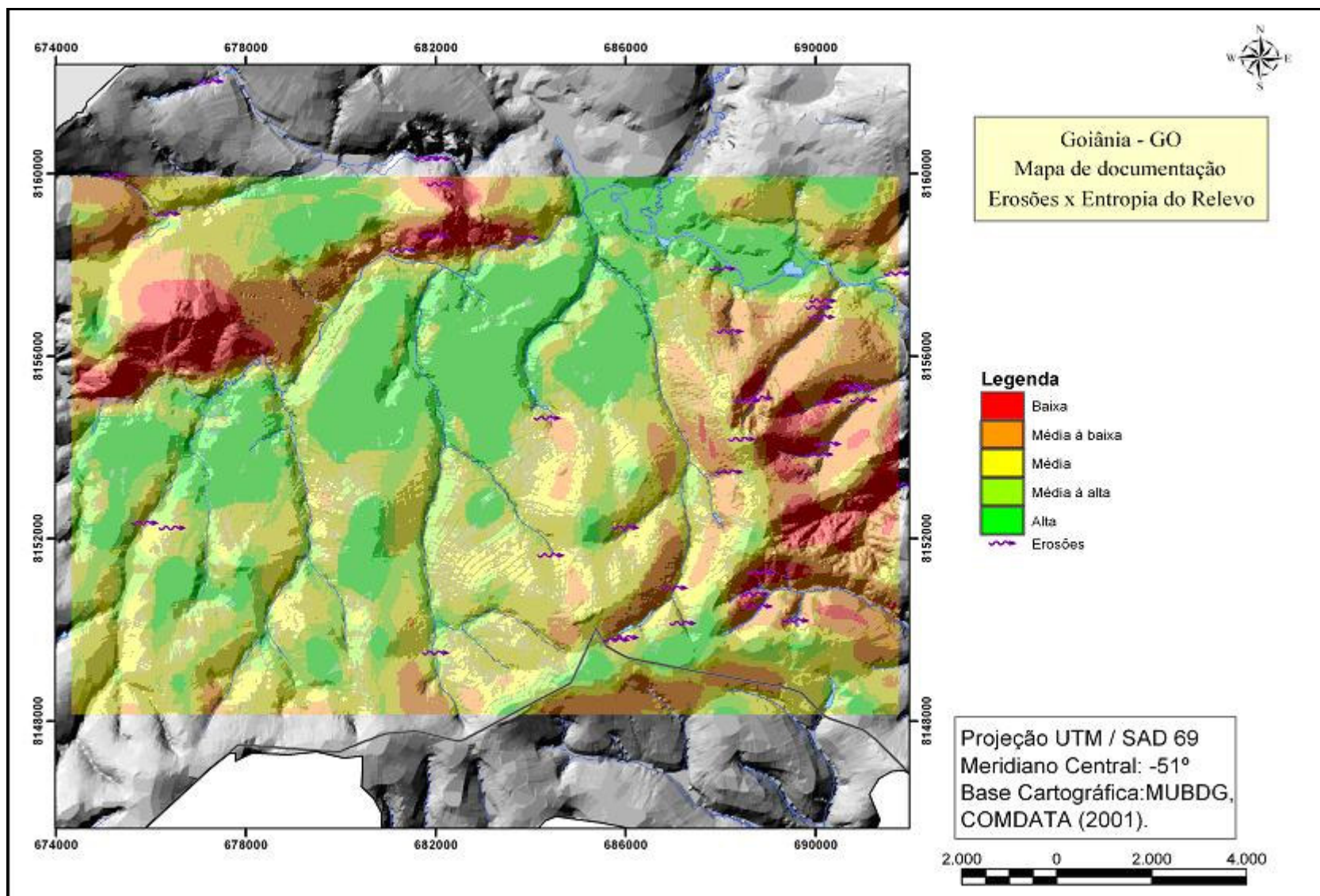


Figura 6.18. Localização dos focos de processos erosivos em relação à entropia do relevo, para a área em detalhe.

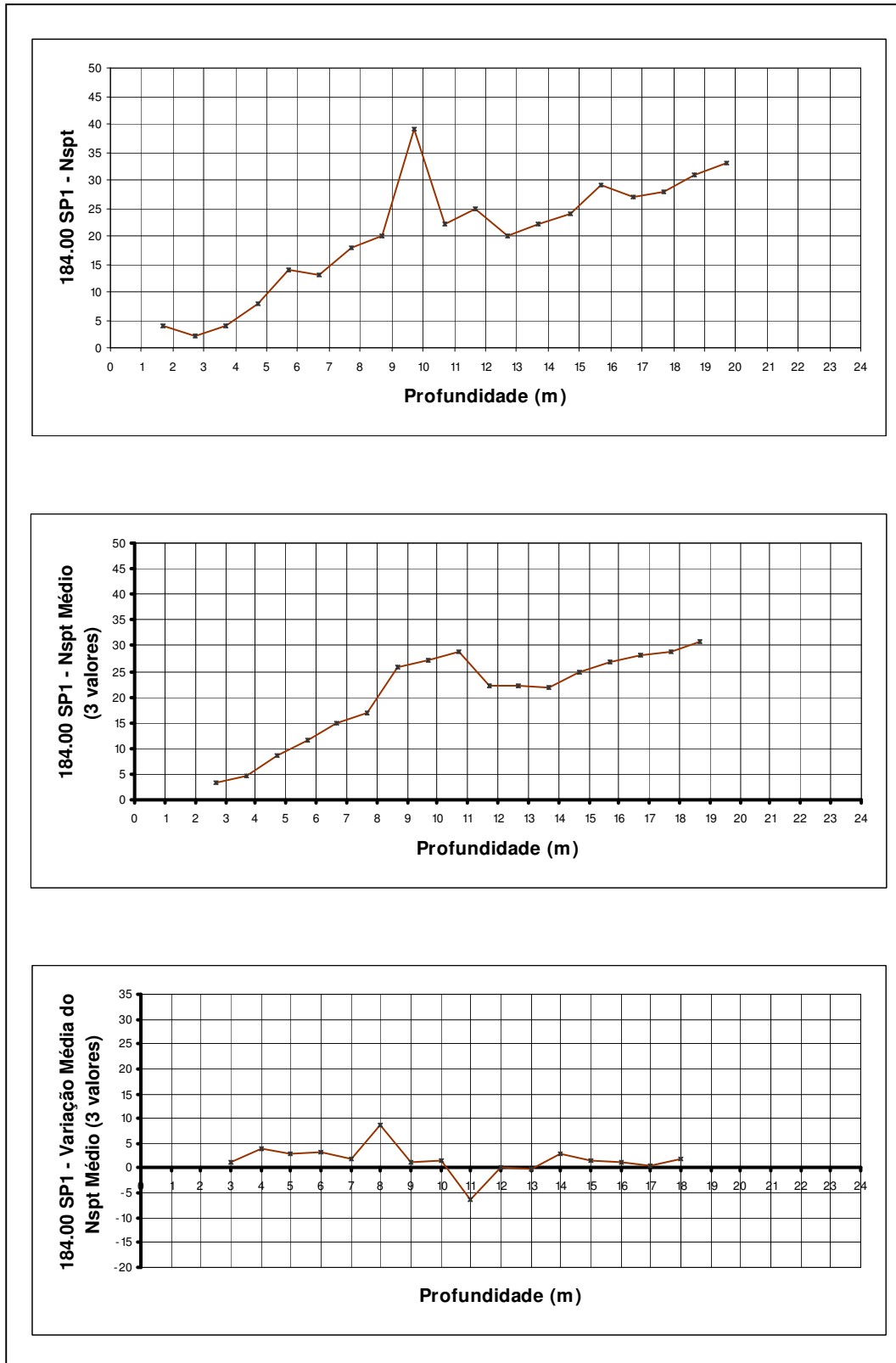


Figura 6.19. Gráficos relativos à sondagem 184.00/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.

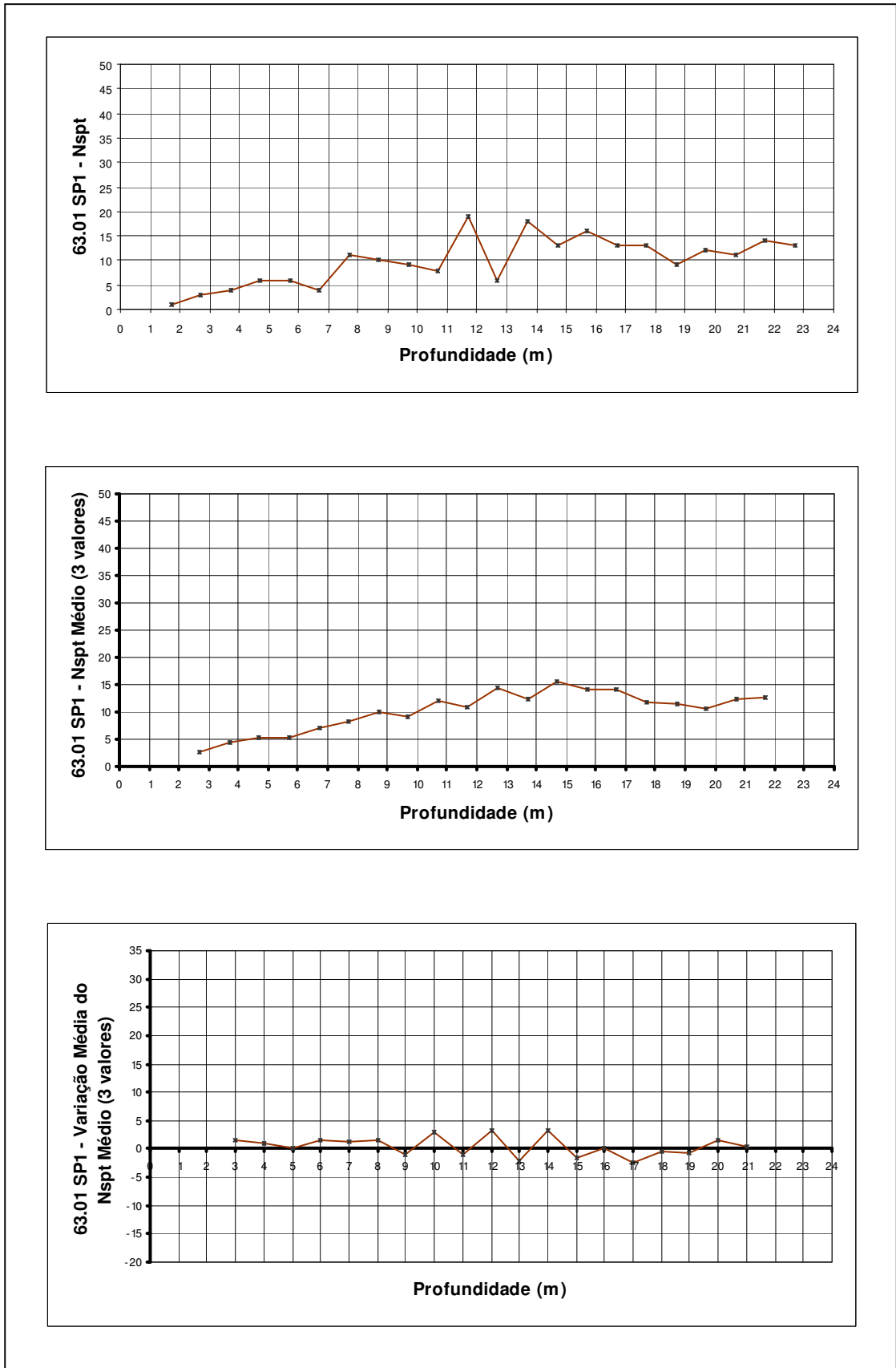


Figura 6.20. Gráficos relativos à sondagem 63.01/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.

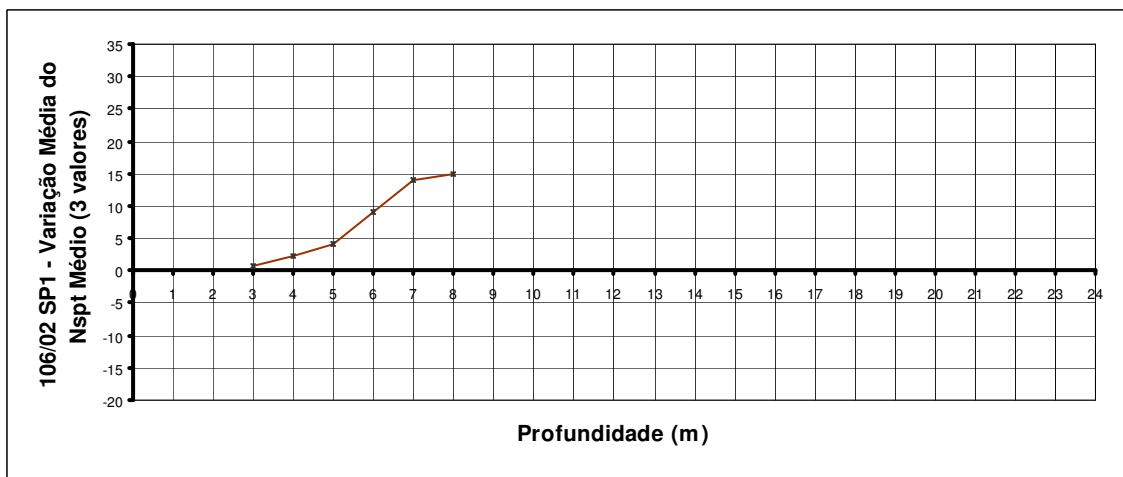
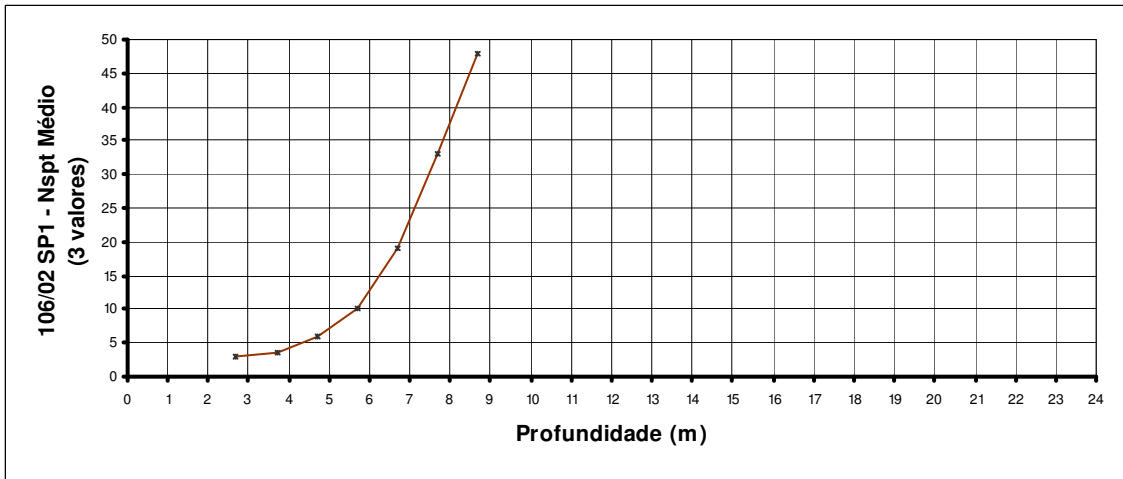
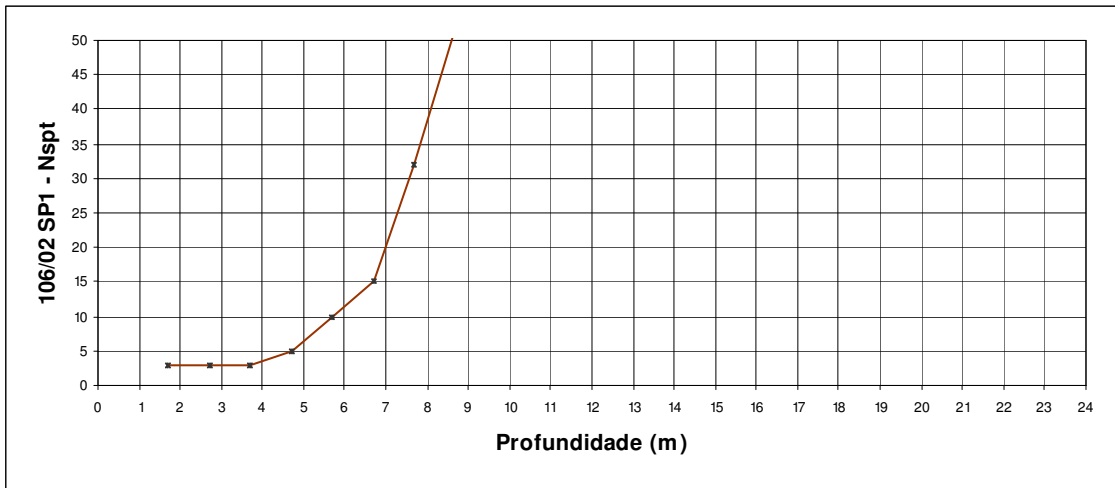


Figura 6.21. Gráficos relativos à sondagem 106/02/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.

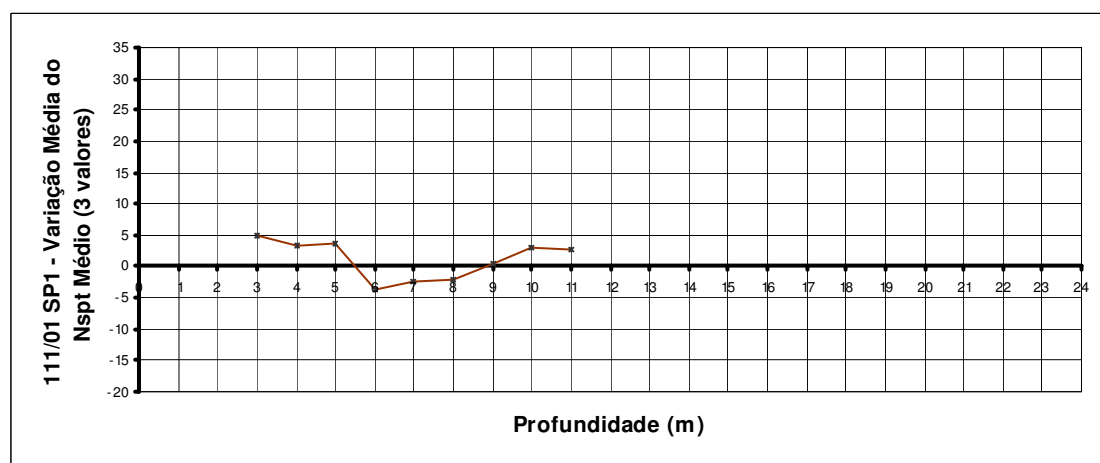
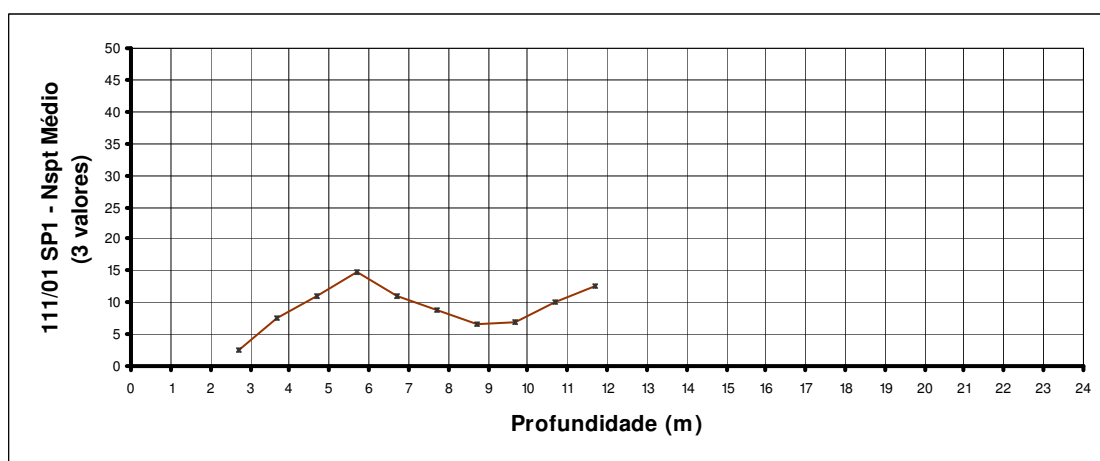
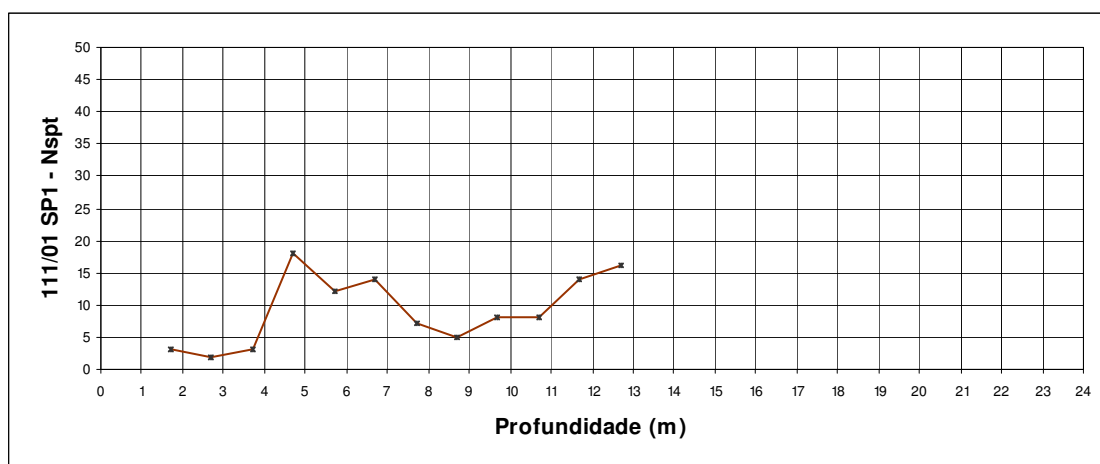


Figura 6.22 Gráficos relativos à sondagem 111/01/SP1, que representam a variação dos índices Nspt com a profundidade.

O gráfico da Fig. 6.21 apresenta um comportamento típico, em que nas primeiras profundidades referentes em geral ao material argilo-arenoso (até 4 metros), os valores de Nspt não sofrem variação, e a partir dessa profundidade crescem com a profundidade até o impenetrável. Esse tipo de gráfico é comum em região de rochas paraganulíticas.

A Fig. 6.22 representa um dos gráficos que ocorrem sobre as rochas ortogranulíticas. Com exceção da camada argilosa superficial, o restante do perfil apresenta variabilidades maiores, em que concreções lateríticas e pedregulhos de quartzo aumentam a resistência de camadas argilosas, alcançando o perfil, em alguns casos, profundidades maiores que as dos gráficos apresentados.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A realização deste trabalho permitiu as conclusões que são destacadas a partir do que se segue. A região de Goiânia modelada a partir da matriz de altitudes referente a curvas de nível equidistantes de 5 m foi compartimentada segundo a morfologia do terreno, a partir de índices morfométricos elementares e complexos. Os índices elementares, altitude, gradiente, orientação e curvatura caracterizaram o relevo da área de estudos como na sua maior parte de declividades baixas, entre 0 e 2%, com vertentes orientadas segundo direções preferenciais, principalmente para noroeste e oeste, configurando extensas rampas, da direção aproximada norte-sul, principalmente na parte mais central do município, de onde se desenvolveu o núcleo urbano. É possível assim dividir a área de pesquisa, quanto à morfologia do terreno, nas partes norte/noroeste, centro-oeste/sudeste, central, leste e sul. Os elementos de referência para essa divisão consistem no ribeirão Anicuns, em parte do rio Meia Ponte e ao sul nas vertentes que em relação a sua orientação encontram-se na sua maioria voltadas para o sul e sudeste da área.

A elaboração da carta de curvaturas, tanto plana quanto do perfil, depende inicialmente da definição dos tamanhos dos menores elementos morfométricos, o que pode ser definido pelos tamanhos dos interflúvios (tamanho na direção transversal ao comprimento) presentes na área a ser modelada. No caso específico da área de pesquisa, a maioria pode ser mais adequadamente modelada em células de 50 x 50 m. A elaboração da carta de entropia também apresentou uma dependência do tamanho dos elementos morfológicos do relevo, sendo assim possível concluir que para a classificação de um terreno quanto a esses atributos morfométricos é necessária uma adaptação da resolução espacial dos produtos pretendidos aos elementos do terreno.

Quanto à textura do material inconsolidado é possível destacar a frequência do horizonte superficial argiloso e, dependendo da localização norte ou centro-sul da área de estudos, os trechos subjacentes do perfil, em profundidade, apresentaram materiais desde material silteoso até argiloso, sendo comum a ocorrência de horizontes compostos também por pedregulhos de quartzo e de concreções lateríticas ao norte da área. Ao sul da área, principalmente na região central (concordante com a maior densidade de amostras analisadas), é comum a ocorrência sob o material argilo-arenoso de material silteoso, com intercalações frequentes de maior contribuição micácea e de pedregulhos de quartzo.

Assim, quanto aos perfis típicos da região, foi possível resumir as descrições existentes nos boletins de sondagens, como composto principalmente pelo horizonte mais superficial, com espessuras em geral variando de 3 a 15 m, caracterizada como um material

argiloso vermelho, por vezes arenoso, sobrejacente ao substrato rochoso composto por xistos micáceos do Grupo Araxá Sul de Goiás. Os índices de Nspt nessa região se caracterizaram por valores que oscilam em geral entre 3 e 10 golpes. Essas regiões possuem maior entropia, menores declividades.

A modelagem apresentou maior coerência nas regiões de maior densidade de amostras relativas aos dados de investigações geotécnicas, sendo assim possível definir a resolução espacial da base de informações georreferenciadas digitais.

Quanto à espessura do material inconsolidado, foi possível relacionar as maiores espessuras às quebras negativas do relevo.

A variabilidade das condições do subsolo analisadas segundo a inclinação da reta de variação da resistência com a profundidade possibilitou a correlação do horizonte argiloso superficial com a menor variação de valores nas profundidades iniciais e um aumento das resistências com a profundidade em perfis de solos residuais (argila arenosa sobre silte, esse último provavelmente correspondente ao horizonte saprolítico). Em outras situações são diversos os comportamentos, inclusive de diminuição da resistência com a profundidade por causa da ocorrência de material micáceo ou então o aumento da resistência localmente por causa de contribuição arenosa ou de pedregulhos de quartzo, ou de concreções ferruginosas.

Considerando o efeito da topografia sobre os processos hidrológicos e sedimentares, a partir da pesquisa é possível concluir que a energia potencial do relevo se refletiu nas classes de entropia e que a influência da curvatura do perfil sobre a aceleração e desaceleração do fluxo vertical, em conjunto com o gradiente do relevo (que influencia a sua velocidade), auxiliou a definição de regiões de possíveis deposições de material associadas às maiores espessuras de solo.

Quanto a sugestões para pesquisas futuras que se desdobraram desta pesquisa, é possível destacar os pontos que se seguem.

Da elaboração da carta de entropia, chegando a um produto que refletisse o índice de dissecação da região, quanto à metodologia empregada, a mesma poderia ser implementada, quanto aos algoritmos utilizados no sentido de otimizar o processo de cálculo e a viabilização da geração dos produtos cartográficos relativos à entropia.

Sugere-se que seja realizado o mapeamento das feições do relevo em escala maior que a existente utilizando-se além de outros dados, informações referentes aos atributos morfológicos do terreno, modelados de forma digital a partir de informações topográficas.

Os valores dos índices N_{spt} podem também ser modelados em índices médios de furos localizados em cada lote, de determinado tamanho, levando-se em conta a variabilidade das condições geotécnicas dos materiais em profundidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abel, L. S. (2002). Caracterização Geológica-Geotécnica do Solo de Laulane para Fundações de Edifícios. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM - 090A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.
- Albrecht, J. & Car, A. (1999). Gis analysis for scale-sensitive environmental modeling based on hierarchy theory. GIS for Earth Surface Systems – Analysis and Modeling of the Natural Environment. Dikau, R. & Saurer, H. Borntraeger, Stuttgart, 197 p.
- Amaral, C. & Lara, A. (1998). Mapa geológico-geotécnico 1:10.000 voltado para o entendimento dos processos e riscos a escorregamentos no Rio de Janeiro. Anais do 3o. Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, NBGE/UFSC/LAMGEO, Florianópolis, SC, Anais em CD.
- Argento, M. S. F. (1995). Mapeamento Geomorfológico. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos, Guerra, A. T. & Cunha, S. B. da (org.), 2 ed., Bertand Brasil, Rio de Janeiro, RJ, pp.: 365-391.
- Augusto Filho, O., Ridente Júnior, J. L., e Alves, C. F. de C. (1999). Compartimentação geotécnica da área urbana do município de São José do Rio Preto (SP) com base na generalização espacial de dados de sondagem à percussão. Anais do 9º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Pedro, Anais em CD.
- Briggs, D. J. & Shishira, E. K. (1985). Soil variability in geomorphologically defined survey units in the Albudeite area of Murcia Province, Spain. Soils and Geomorphology, Catena Supplement 6, pp.: 69-84.
- Burrough, P. A. (1991). Soil information systems. Geographical Information Systems, Vol. 2: Applications, Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, W. D. (eds.). Longman & Scientific Technical / John Wiley & Sons, New York, USA, pp.: 153-169.
- Burrough, P. A. & McDonnell, R. A. (1998). Principles of geographical information systems. Oxford University Press, New York, USA, 333 p.
- Câmara G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M. (1996). SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Computer & Graphics, 20 (3): 395-403.
- Campos, J. E. G., Rodrigues, A. P., Almeida, L., Resende, L., Magalhães, L. F., Maranhão Sá, M. A. (2003). Diagnóstico Hidrogeológico da Região de Goiânia. AGIM/GO Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria da Indústria e Comércio, Goiânia, GO, 125 pp.
- Casseti, V. (1981). Sugestões para a compartimentação do relevo através do tratamento gráfico de informações. Boletim Goiano de Geografia, 1(2): 54-60.
- Casseti, V. (1992). Geomorfologia do município de Goiânia – GO. Boletim Goiano de Geografia, 12 (1): 65-85.
- Christofoletti, A. (1980). Geomorfologia. Edgard Blücher, São Paulo, SP, 188 p.
- Collares, E. G., Dias, V. S., Pereira, L. A., Castro, A. D. (1999). Caracterização geológico-geotécnica da área de expansão urbana de Passos - MG. Anais do 9o. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, Anais em CD.
- Collares, E. G. & Lorandi, R. (1995). A caracterização dos materiais inconsolidados na compartimentação geotécnica da região de Bragança Paulista – São Paulo. Revista do Instituto Geológico, IG, Volume especial:115-120.
- COMDATA - Cia. de processamento de dados do município de Goiânia. (1999). SIGGO – Sistema de Informações Geográficas de Goiânia, v.2, para Windows 95/98/NT, Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (MUBDG V.9). Governo da cidade de Goiânia.
- COMDATA - Cia. de processamento de dados do município de Goiânia. (2001). MUBDG – Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia. CD-ROM Profissional Versão 13 - Parte integrante do SIGGO V13. Prefeitura de Goiânia.

- Connelly, D. S. (1972). *Geomorphology and information theory. Spatial Analysis in Geomorphology*, Chorley, R. J. (ed.), Harper & Row, Publishers, New York, USA, pp.: 91-108.
- Costa, A. A., Marinho, M. A. S. M., Esber, Z. (1994). *Mapeamento do subsolo de Goiânia. Trabalho de final de curso de graduação em engenharia civil*, EEC/UFG, Goiânia, GO, 144 p.
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York, 646 p.
- Dearman, W. R. (1991). *Engineering Geological Mapping*. Butterworth-Heinemann, London, 387 p.
- Diniz, N. C. (1998). *Automação da cartografia geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes*, Vol. 1, Escola Politécnica - USP, São Paulo, SP, 297 pp.
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (1999). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Embrapa - Produção de Informação, Brasília, DF, 412 p.
- Evans, I. S. (1972). *General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology*, Chorley, R. J. (ed), Harper & Row, Publishers, New York, USA, pp.: 17-90.
- Evans, I. S. (1980). *An integrated system of terrain analysis and slope mapping. Zeitschrift Fur Geomorphologie, N. F. Suppl., Bd. 36*, pp.: 274-295.
- Felgueiras, C. A. (2001). *Modelagem numérica de terreno. Introdução à ciência da geoinformação*, Câmara, G., Davis, C., Monteiro, A. M. V. (eds). INPE, São José dos Campos.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales*, Pentalfa Ediciones, Oviedo, 222 p.
- Fernandes, M. C. & Menezes, P. M. L. M. (2005). *Avaliação de métodos de geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real: um estudo de caso no maciço da Tijuca-RJ. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, GO, pp.: 2985-2992.
- Folle, D., Costa, J. F. C. L., Koppe, J. C. (2001). *Geração de mapas de SPT: uma abordagem geoestatística. Infogeo 2001: Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia*, ABMS/UFPR, Curitiba, PR, Anais em CD.
- Franklin, S. E. & Peddle, D. R. (1987). *Texture analysis of digital image data using spatial cooccurrence. Computers & Geosciences*, 13 (3): 293-311.
- Friedrich, K. (1998). *Multivariate distance methods for geomorphographic relief classification. Land Information Systems: Developments for Planning the Sustainable Use of Land Resources*, Heineke, H. J., Eckelmann, W., Thomasson A. J., Jones, R. J. A., Montanarella, L. & Buckley, B. (eds). European Communities, Luxembourg, pp.: 259 - 266.
- Genevois, B. B. P. & Oliveira, G. M. P. (2001). *Identificação de camadas de solo mole na região sul da cidade do Recife. Infogeo 2001: Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia*, ABMS/UFPR, Curitiba, Anais em CD.
- Grant, T. K. & Finlayson, A. A. (1978). *The Assessment and Evaluation of Geotechnical Resources in Urban or Regional Environments. Research Paper No. 309 of the division of Applied Geomechanics, Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization. Reprinted from: Engineering Geology*, 12 (3): 219-293.
- Grant, T. K. (1975). *The PUCE Programme for Terrain Evaluation for Engineering Purposes. I – Principles. Division of Applied Geomechanics Technical Paper No. 15*, CSIRO, Austrália, 32 p.

- Hermuche, P. M., Guimarães, R. F., Carvalho, A. P., Martins, E. S., Fucks, S. D., Carvalho Júnior, O. A. (2003). Processamento digital de imagens morfométricas para subsidiar o mapeamento pedológico. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, MG, pp.: 123-130.
- Horn, B. K. P. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69 (1): 14-47.
- Huggett, R. J. (1975). Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, 13 (1):1-22.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (1999). Saneamento Básico e Problemas Ambientais em Goiânia - 1992. IBGE, Divisão de Geociências do Centro-Oeste. Rio de Janeiro, 81 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (1998). Manual Técnico de Geologia. IBGE, Rio de Janeiro, RJ, 306 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003). Atlas do Censo Demográfico 2000. IBGE, Rio de Janeiro, RJ, 127 p.
- IPLAN - Instituto de Planejamento Municipal / IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / UFG - Universidade Federal de Goiás. (1991). Mapa de solos. Carta de Risco de Goiânia, Goiânia.
- IPLAN - Instituto de Planejamento Municipal. (1992). Plano de desenvolvimento Integrado de Goiânia, vol.1, IPLAN, Goiânia, GO, 112 p.
- Joos, G. (1958). *Theoretical Physics*. Blackie & Son Limited, London, 885 p.
- Landim, P. M. B. (1998). *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Fundação Editora da UNESP, São Paulo, SP, 226 p.
- Lara, A. A., Marques, E. A. G., Vieira, L. S., Gonzaga, G. G., Amaral, C. P. (1996). Mapeamento de risco de acidentes associados a escorregamentos na favela do morro da Mangueira, Rio de Janeiro. Brasil. 2o. Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, ABGE, São Carlos, SP, pp.: 41-49.
- Leopold, L. B. & Langbein, W. B. (1962). The concept of entropy in landscape evolution. U. S. Geological Survey Professional Paper, 500-A: 1-20.
- Libault, A. (1975). *Geocartografia*. Ed. Nacional, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 388 p.
- Liporaci, S. R., Röhm, S. A., Pedro, F. G., Cereda Júnior, A. (2002). Mapeamento geológico de parte do município de São Carlos na escala de 1:10.000, com ênfase na região urbana e de expansão, como base para elaboração de um planejamento urbano/ambiental. 10o. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Ouro Preto, MG, Anais em CD.
- Mauro, J. R. & Lollo, J. A. (2001). Carta de susceptibilidade à erosão na Bacia do Prosa – Campo Grande (MS). IV Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica. ABGE. Brasília. Anais em CD.
- McCoy, J. & Johnston, K. (2002). *Using ArcGis Spatial Analyst*. GIS/ESRI, New York, USA, 232p.
- McKenzie, N. J. & Ryan, P. J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89: 67-94.
- Mattos, R. S. & Veiga, A. (2002). Otimização de entropia: implementação computacional dos princípios MaxEnt e MinxEnt. *Pesquisa Operacional*, 22 (1): 37-59.
- Meijerink, A. M. J., Brouwer, H. A. M., Mannaets, C. M., Valenzuela, C. (1994). Introduction to Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology. ITC, UNESCO, The Netherlands, 242 p.

- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Process*, 5: 3-30.
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A., Peterson, G. A. (1993). Soil attribute using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 57: 443-452.
- Moreira, M. M. (2002). Mapeamento Geotécnico e Reconhecimento dos Recursos Hídricos e do Saneamento da Área Urbana do Município de Natal – RN: Subsídios para o Plano Diretor. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-11A/2002. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, DF. 282 p.
- Moreira, C. V. R. & Pires Neto, A. G. (1998). Clima e relevo. *Geologia de Engenharia* Oliveira, A. M. S. & Brito, S. N. A. (eds). ABGE, São Paulo, 576 p.
- Moreton, L.C. (1994). Estratigrafia. Moreton, L.C. (org.) Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Goiânia – Folha SE.22-X-B-IV. Estado de Goiás. Escala 1:100.000. DNPM/CPRM, Brasília, DF, 124 p.
- Nascimento, M. A. S. & Podestá Filho, A. (1993). Carta de risco de Goiânia. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, 13 (1): 95-105.
- Nascimento, M. A. L. S. & Sales, M. M.. (2003). Diagnóstico do processo erosivo em Goiânia. X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, IGEO/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Anais em CD.
- Normas técnicas da cartografia nacional. (1984). Normas Cartográficas. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. *Dicionário Cartográfico*. (1993). Oliveira, C. (ed.), IBGE, Rio de Janeiro, RJ, pp.: 642-645.
- Novaes Pinto, M. (1985). Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia*, pp: 9-25.
- Odeh, I. O. A., Chittleborough, D. J., Mc Bratney, A. B. (1991). Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. *Geoderma*, 49: 1-32.
- Oliveira, C. M. G. & Lollo, J. A. (2001). Uso da avaliação do terreno para o zoneamento de solos colapsíveis na área urbana de Ilha Solteira (SP). IV Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, UnB/ABGE, Brasília, DF, Anais em CD.
- Oliveira, M. G. (1996). Mapeamento geotécnico da Asa Sul, Brasília - DF. Dissertação de Mestrado, G.DM-036A/96, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 pp.
- Parizzi, M. G., Porto, C. G., Piumbini, B. S., Rosiere, C. A. (2002). Caracterização geológico-geotécnica e avaliação do risco do Conjunto Taquaril, Belo Horizonte (MG). 10o. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Ouro Preto, MG, Anais em CD.
- Robinson, A. H., Morrison, J. L., Muehrcke, P. C., Kimerling, A. J., Guptill, S. C. (1995). *Elements of Cartography*. Sixth edition. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA, 674 p.
- Ruhe, R. V. (1975). *Geomorphology - Geomorphic Process and Surficial Geology*. Houghton Mifflin Company, Boston, 246 p.
- Schmidt, J. & Dikau, R. (1999). Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models – Semantics, methods, future needs. *GIS for Earth Surface Systems – Analysis and Modeling of the Natural Environment*. Dikau, R. & Saurer, H. Borntraeger, (eds.). Stuttgart, 197 p.
- Schnaid, F. (2000). *Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. Oficina de Textos, São Paulo. 183 p.
- Scislewski, G. (1994). Introdução. Moreton, L.C. (org.) Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Goiânia – Folha SE.22-X-B-IV. Estado de Goiás. Escala 1:100.000. DNPM/CPRM, Brasília, DF, 124 p.

- Shannon, C. E. & Weaver, W. (1962). *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press, USA, 117 pp.
- Sinowski, W. & Auerswald, K. (1999). Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma*, 89: 113-128.
- Soares, P. C. & Fiori, A. P. (1976). Lógica sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias Geomorfológicas*, 16(32): 71-104.
- Souza, N.M. (1995). A cartografia geotécnica como instrumental da geografia física para estudos urbanos. VI Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada, UFG, Goiânia, GO, 1: 19-20.
- Sturaro, J. R. & Landim, P. M. B. (1996). Mapeamento geoestatístico de ensaios de penetração padronizada (SPT). *Solos e Rochas*, 19 (1): 3-14.
- Sturaro, J. R., Landim, P. M. B., Riedel, P. S. (2000). O emprego da técnica geoestatística da krigagem indicativa em geotecnia ambiental. *Solos e Rochas*, 23 (3): 157-164.
- Talamini Neto, E. & Celestino, T. B. (2001). Utilização de SIG e geoestatística no mapeamento geotécnico do subsolo de Curitiba: aplicação ao planejamento de uso do espaço subterrâneo. INFOGEO 2001: Simpósio Brasileiro de aplicações de Informática em Geotecnia, ABMS/ UFPR, Curitiba, PR, Anais em CD.
- Troeh, F. R. (1965). Landform equations fitted to contour maps. *American Journal of Science*, 263: 616-627.
- UNESCO/IAEG - International Association of Engineering Geology. (1976). *Engineering Geological Maps - A Guide to Their Preparation*. The UNESCO Press, Paris, 226 p.
- Varnes, D. J. (1974). The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes. *Geological Survey Professional Paper*, 837, 48 p.
- Vita, C. L. (1984). Landform-based characterization of soil properties. *Probabilistic Characterization of Soil Properties: bridge between theory and practice*. Part II: Case Studies. Bowles, D. S. & KO, H. - K. (ed.). American Society of Civil Engineers. New York. pp.: 170-182.
- Wood, J. (1996) *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*. PhD Thesis, University of Leicester, UK. (<http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/>)
- Xavier, S. R. & Romanel, C. (2000). Análise da distribuição espacial dos valores do ensaio SPT através de método estatístico. IV Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3: 138 – 147.
- Zaine, J. E. & Cerri, L. E. S. (2002). Avaliação geológico-geotécnica de unidades de corbetura de material inconsolidado na região norte da cidade de Rio Claro (SP). 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Ouro Preto, MG, Anais em CD.
- Zdenkovic, L. M. & Scheidegger, E. A. (1989). Entropy of landscapes. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, N. F. 33 (3): 361-371.
- Zevenbergen L. W. & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 47-56.
- Zuquette, L. V. & Nakazawa, V. A. (1998). *Cartas de geologia de engenharia*. Geologia de Engenharia. Oliveira, A. M. do S. & Brito, S. N. A. (eds.), ABGE, São Paulo, SP, pp. 283-300.
- Zuquette, L. V. & Pejon, O. J. (1996). Carta de zoneamento geotécnico geral da região de Franca-SP utilizando os critérios de landforms. II Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, ABGE, São Carlos, SP. pp.: 165-174.

