

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E VISÕES FRACTAIS DA
GEOMETRIA DO RELEVO**

MATEO ARENAS RIOS

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-205/12

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2012

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

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E VISÕES FRACTAIS DA
GEOMETRIA DO RELEVO**

MATEO ARENAS RIOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)

(ORIENTADOR)

ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

ANA LUIZA COELHO NETTO, PhD (UFRJ)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de março de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

ARENAS-RÍOS, MATEO

Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo [Distrito Federal] 2012

xx, 128 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Cartografia geotécnica

2. Geometria fractal

3. Rugosidade do terreno

4. Padrões de drenagem

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARENAS-RÍOS, M. (2012). Estudo Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-205/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mateo Arenas Ríos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Cartografia geotécnica e visões fractais da geometria do relevo.

GRAU / ANO: Mestre / 2012

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

“Conhece-te a ti mesmo e conhecerás o universo e os Deuses”

AGRADECIMENTOS

Não gosto de “agra-descer”, prefiro “agra-subir”. Conheço uma quantidade inumerável de seres a quem gostaria de “agrasubir” pela troca de energias durante o desenvolvimento deste trabalho (e durante a vida); como o tempo e a quantidade de páginas são limitados, “agrasubirei” pessoalmente a cada um no momento oportuno.

Destaco especial admiração pelos mestres guerreiros da geotecnia: o mestre Hernán Martínez, o mestre Márcio Muniz, o mestre José Camapúm e o mestre Newton M. de Souza; este último forneceu *insights* materialmente intangíveis mediante o exemplo do trabalho assíduo empacotado numa mistura de inquietação de criança com paciência de velho sábio. Para todos eles, os melhores desejos e “agrasubimentos”.

RESUMO

Em regiões como o Distrito Federal do Brasil (DF) a configuração geométrica do relevo está relacionada com o conteúdo do substrato litológico superficial, isto é evidente em duas feições: A textura da superfície e o arranjo dos padrões de drenagem. Existem tentativas para estimar parâmetros quantitativos que descrevam estas duas feições, tais como a rugosidade e a densidade de drenagem; porém, ainda não há consenso na comunidade científica sobre a formulação mais satisfatória para abordar esta noção.

Esta é uma proposta alternativa que explora os fractais como possibilidade de abordagem das relações quantitativas entre a geometria do terreno e a compartimentação superficial do substrato litológico subjacente ao terreno.

Trabalhou-se com base cartográfica do DF, numa escala 1:10.000 e produziram-se cartas de densidade de drenagem e rugosidade topográfica baseados na dimensão fractal dos conjuntos hidrográficos e contornos topográficos, respectivamente. Os produtos foram comparados com as cartas de solos e hidrogeologia da região, obtendo relações satisfatórias.

Os parâmetros propostos também foram comparados com outros índices usados tradicionalmente para abordar estas mesmas feições do terreno, encontrando na geometria fractal uma ferramenta de muita utilidade prática para a análise geomorfométrica.

Adicionalmente explorou-se o uso de interpoladores fractais para melhorar a resolução de imagens digitais de superfícies topográficas, encontrando resultados realistas e de grande utilidade para fins cartográficos.

ABSTRACT

In zones like *Distrito Federal do Brazil* (DF) geometric configuration of relief is related to the content of superficial lithological substrate, this is evident through two features: Surface texture e drainage pattern arrange. There exist attempts to estimate quantitative parameters to describe those features, as roughness and drainage density, but there is no consensus between scientific communities about most satisfactory formulation to approach that notion.

Here is an alternative purpose which explores fractals as a possibility to approach quantitative relations between relief geometry and superficial segmentation of the lithological substrate underlying terrain.

It was worked on DF with a scale of 1:10.000 and there were produced charts of drainage density and topographical roughness, both based on fractal dimension of hydrographic sets and topographical contours respectively. Results were compared with the soil and hydrogeology charts of the zone, having satisfactory results in both cases.

The proposed parameters were also compared with other index traditionally used to approach those features of terrain, concluding that fractal geometry is an useful tool in geomorphometric applications.

Additionally, it was explored the use of fractal interpolators to improve the resolution in digital images of topographical surfaces, founding realistic results and utility for cartographic purposes.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	METODOLOGIA	3
1.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	4
2.	CONSIDERAÇÕES SOBRE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA	5
2.1	PROJEÇÕES CARTOGRÁFICAS	5
2.2	CONCEITO BÁSICO DE ESCALA	6
2.3	CARTAS GEOTÉCNICAS	9
2.3.1	ABORDAGEM ANALÍTICA	9
2.3.2	ABORDAGEM SINTÉTICA	11
2.4	ZONEAMENTO GEOTÉCNICO	11
2.4.1	IPT	12
2.4.2	PUCE (<i>Pattern Unit Component Evaluation</i>)	12
2.4.3	IAEG (<i>International Association for Engineering Geology</i>)	13
2.4.4	MÉTODO DAS MATRIZES	14
2.4.5	MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS (DSM)	14
3.	NOÇÕES SOBRE GEOPROCESSAMENTO	16
3.1	ESTRUTURAS DE DADOS	17
3.1.1	VETORIAL	17
3.1.2	MATRICIAL	17
3.2	ALGORITMOS GEOMORFOMÉTRICOS	19
3.3	CRIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO (MDT)	21
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	21
4.	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE GEOMETRIA FRACTAL	22
4.1	INTRODUÇÃO À GEOMETRIA FRACTAL	23
4.2	A DIMENSÃO FRACTAL	27
4.3	PROCESSOS FRACTAIS E O MOVIMENTO BROWNIANO	28
4.4	ANÁLISE FRACTAL	29
4.4.1	DIMENSÃO DE HAUSDORFF	29
4.4.2	MÉTODO DA CONTAGEM DE CÉLULAS (<i>BOX-COUNTING</i>)	30
4.4.3	ANÁLISE DE HURST	31
4.4.4	MÉTODO DA COBERTURA PROJETIVA	32

4.4.5	ESTIMAÇÕES DIFERENCIAIS	33
4.5	MULTIFRACTAIS.....	33
4.6	LACUNARIDADE.....	35
4.7	COMENTÁRIOS SOBRE OS FRACTAIS.....	35
5.	A TEXTURA DO RELEVO	37
5.1	ABORDAGEM CLÁSSICA DA MORFOMETRIA DO RELEVO.....	38
5.2	RELAÇÕES ENTRE OS PADRÕES DO RELEVO E O SUBSTRATO SUBJACENTE.....	40
5.3	PARÂMETROS BÁSICOS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE.....	41
5.4	ÍNDICES DE RUGOSIDADE	44
5.4.1	RELAÇÃO DE ÁREAS	44
5.4.2	DESVIO PADRÃO DA DECLIVIDADE.....	44
5.4.3	DESVIO PADRÃO DA CURVATURA DO PERFIL	44
5.4.4	DESVIO PADRÃO DA ALTURA.....	45
5.4.5	ABORDAGEM FRACTAL DA TEXTURA.....	45
5.4.6	SIMULAÇÃO DE TERRENOS FRACTAIS	45
5.5	SUMÁRIO DO CAPÍTULO	47
6.	PADRÕES DE DRENAGEM.....	48
6.1	MORFOMETRIA DE DRENAGENS.....	49
6.1.1	ANÁLISE TRADICIONAL DA FORMA DAS DRENAGENS.....	52
6.2	PADRÕES DE DRENAGEM TÍPICOS	53
6.2.1	DENDRÍTICA	53
6.2.2	TRELIÇA	53
6.2.3	RADIAL.....	54
6.2.4	ANELAR.....	54
6.2.5	PARALELA	55
6.2.6	ABERTA	55
6.2.7	CÁRSTICA	55
6.2.8	DESÉRTICA.....	56
6.2.9	FECHADA	56
6.2.10	IRREGULAR	56
6.3	PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS ASSOCIADOS ÀS DRENAGENS.....	57
6.3.1	MORFOMETRIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	57
6.3.2	MORFOMETRIA DE RIOS E CANAIS INDIVIDUAIS.....	58
6.3.3	MORFOMETRIA DE REDES DE DRENAGEM.....	59
6.4	ABORDAGEM FRACTAL DOS PADRÕES DE DRENAGEM.....	62

6.5	SIMULAÇÃO DE PADRÕES DE DRENAGENS FRACTAIS.....	63
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS PADRÕES DE DRENAGEM.....	64
7.	CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO	66
7.1	ASPECTOS POLÍTICOS, HISTÓRICOS E GEOGRÁFICOS.....	66
7.2	GEOMORFOLOGIA.....	67
7.2.1	DOMO.....	67
7.2.2	ESCARPAS.....	68
7.2.3	PLANALTOS.....	68
7.2.4	RELEVOS DOBRADOS.....	69
7.2.5	VALES DE DISSECAÇÃO.....	69
7.3	GEOLOGIA.....	73
7.4	SOLOS.....	75
7.5	BIOMA.....	78
7.6	HIDROGRAFIA.....	79
7.6.1	PADRÕES DE DRENAGEM DO DF.....	79
7.6.2	HIDROGEOLOGIA.....	80
8.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	85
8.1	COMPUTADORES.....	85
8.2	PROGRAMAS DE COMPUTADOR.....	85
8.3	BANCO DE DADOS.....	86
8.4	METODOLOGIA DE TRABALHO.....	87
9.	ANÁLISES E RESULTADOS.....	88
9.1	DEFINIÇÃO DA ESCALA DE TRABALHO.....	88
9.2	PRE-PROCESSAMENTO.....	88
9.3	ANÁLISE MULTIFRACTAL.....	89
9.4	CARTAS BASEADAS NA DIMENSÃO FRACTAL.....	92
9.5	VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA.....	98
9.5.1	SUBCONJUNTOS AMARELOS.....	99
9.5.2	SUBCONJUNTOS ROXOS.....	101
9.6	INFERÊNCIA DE DADOS.....	103
9.6.1	INFERÊNCIA BOOLEANA.....	103
9.6.2	INFERÊNCIA MEDIANTE FÓRMULA ANALÍTICA.....	105
9.7	MODELAGEM DE TERRENOS FRACTAIS.....	108
10.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
10.1	CONCLUSÕES.....	111

10.2	ORIENTAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	112
	REFERÊNCIAS.....	118
	ANEXOS.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tipos de mapas em função da escala (Dearman, 1991).....	7
Tabela 2.2. Resoluções, escalas e extensões sugeridas para mapas digitais.....	7
Tabela 2.3. Escalas de trabalho segundo o tipo de mapa (Gomarasca, 2004).....	7
Tabela 2.4. Ordens de grandeza em função da cobertura do projeto (MMA/SDS, 2001).....	8
Tabela 2.5. Escalas de zoneamento de deslizamentos e suas aplicações segundo Fell, <i>et al</i> (2008)......	8
Tabela 2.6. Sistema PUCE.....	13
Tabela 5.1. Limites texturais.....	39
Tabela 5.2. Parâmetros básicos da superfície terrestre (Shary et al, 2005; Hengl & Reuter, 2009).....	43
Tabela 6.1. Índices para expressar a forma da bacia (Zãvoianu, 1978).....	58
Tabela 6.2. Parâmetros associados à sinuosidade (Zãvoianu, 1978).....	59
Tabela 6.3. Relações entre D_f e atributos das drenagens.....	62
Tabela 7.1. Classificação pedológica da região.....	76
Tabela 7.2. Aquíferos do domínio poroso (Freitas-Silva & Campos, 1998).....	81
Tabela 7.3. Aquíferos do domínio fraturado (Freitas-Silva & Campos, 1998).....	81
Tabela 8.1. Descrição das computadoradoras usadas.....	85
Tabela 8.2. Programas utilizados durante a pesquisa.....	86
Tabela 8.3. Descrição do banco de dados.....	86
Tabela 9.1. Ajustes aos parâmetros estimados.....	92
Tabela 9.2. Matriz de Correlação na amostra Var_01.....	100
Tabela 9.3. Matriz de Correlação na amostra Var_02.....	100
Tabela 9.4. Matriz de Correlação na amostra Var_03.....	100
Tabela 9.5. Matriz média dos módulos de r para as três amostras.....	101
Tabela 9.6. Tabulação cruzada entre a rugosidade e o tipo de solo.....	101
Tabela 9.7. Tabulação cruzada entre a densidade de drenagem e o tipo de solo.....	102

Tabela 9.8. Tabulação cruzada entre a densidade de drenagem e a rugosidade	103
Tabela 9.9. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e os tipos de solos.....	105
Tabela 9.10. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e o domínio poroso da hidrogeologia.....	105
Tabela 9.11. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e os tipos de solos	106
Tabela 9.12. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e o domínio poroso da hidrogeologia.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. A forma da terra.....	5
Figura 2.2. Projeção Transversa de Mercator	6
Figura 2.3. Abordagem analítica mediante modelos matemáticos conhecidos.....	10
Figura 2.4. Abordagem analítica mediante álgebra de mapas	11
Figura 2.5. Matrizes relacionais	14
Figura 3.1. Geralização sobre uso do geoprocessamento neste trabalho	16
Figura 3.2. Modelo simples representado em vários formatos.	17
Figura 3.3. Estrutura <i>raster</i>	18
Figura 3.4. Efeito da resolução do <i>raster</i> na precisão da representação	18
Figura 3.5. Efeito da resolução da grelha na representação da topografia	19
Figura 3.6 Esquema de varridura mediante uma janela móvel de 3x3	20
Figura 3.7. Representação da variação da rugosidade do relevo. Modificado de Grohmann <i>et al</i> (2011)	20
Figura 3.8. Comparação entre o MDT (direita) e o TIN (esquerda).....	21
Figura 4.1. Golfo do Urabá.....	22
Figura 4.2. Quanto mede o litoral do Urabá?	23
Figura 4.3. Triângulo de Sierpinski (esquerda) e curva de Koch (direita).....	24
Figura 4.4. Processo iterativo para a construção da curva de Hilbert	24
Figura 4.5. Ilustração do conceito de fractal no relevo do DF.	25
Figura 4.6. Aldeia de Ba-ila (Camarão); Tomado de Eglash (1999)	26
Figura 4.7. Desenhos de Katsushika Hokusai.....	26
Figura 4.8. Murais de Alhambra (Espanha)	26
Figura 4.9. Iconografia cristã.....	26

Figura 4.10. Mandalas	27
Figura 4.11. Artesanato dos indígenas Shipibo (Perú) comparados com a curva e Hilbert	27
Figura 4.12. Dimensão fractal de superfícies rugosas. Tomadas de Russ (1993).....	28
Figura 4.13. Padrões de drenagem cujas D_f são 1.35 e 1.58 respectivamente.	28
Figura 4.14. Movimento Browniano	29
Figura 4.15. Dimensão de Hausdorff calculada para uma linha reta, um quadrilátero e uma linha fraturada... 30	30
Figura 4.16. Exemplo do método da contagem de células para um rio genérico	30
Figura 4.17. Contagem de células de uma planta em 3D.....	31
Figura 4.18. Simulação de superfícies fracionárias Brownianas (Sahimi, 2000).....	32
Figura 4.19. Método da cobertura projetiva.....	33
Figura 4.20. Dois objetos com a mesma dimensão fractal e diferente lacunaridade.....	35
Figura 5.1. Relevo rugoso: Chapada dos veadeiros (Go, Brasil). Imagem do autor	37
Figura 5.2. Relevo ondulado: DF (Brasil). Fonte: Souza, 1998b.....	37
Figura 5.3. Relevo plano: BR-010 (Go, Brasil). Imagem do autor.	38
Figura 5.4. Superfície plana ou rugosa? Depende da escala de observação. Imagem do autor	38
Figura 5.5 Segmentação do relevo a partir da discordância entre os elementos texturais.....	40
Figura 5.6. Ilustração dos nove tipos básicos de curvatura	42
Figura 5.7. Curvatura do terreno	42
Figura 5.8. Diagrama de fluxo do algoritmo DPM	46
Figura 5.9. Exemplo de paisagem criada mediante o algoritmo DPM numa dimensão	46
Figura 5.10. Conceito do algoritmo DPM para simular superfícies.	47
Figura 5.11. Ilustração de terreno modelado mediante o algoritmo DPM.....	47
Figura 6.1. Padrões de drenagem aparecem cotidianamente	48
Figura 6.2. Sistemas de classificação do grau de estruturação (Zăvoianu, 1978)	50
Figura 6.3. Classificação dos cursos de água (Sugio & Bigarella, 1990).....	52

Figura 6.4. Propriedades das redes de drenagem segundo Soares & Fiori (1978).....	52
Figura 6.5. Padrão de drenagem dendrítica. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	53
Figura 6.6. Padrão de drenagem em treliça. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.	54
Figura 6.7. Padrão radial centrífuga (superior) e centrípeta (inferior). Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	54
Figura 6.8. Padrão de drenagem anelar. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.	54
Figura 6.9. Padrão de drenagem paralela. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	55
Figura 6.10. Padrão de drenagem aberta. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	55
Figura 6.11. Padrão de drenagem cárstica. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.	55
Figura 6.12. Padrão de drenagem desértica. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.	56
Figura 6.13. Padrão de drenagem fechada. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	56
Figura 6.14. Padrão de drenagem irregular. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	56
Figura 6.15. Exemplo de um método de estimação da largura da bacia (Zăvoianu, 1978).....	57
Figura 6.16. Esquemas da sinuosidade hidráulica e topográfica.....	59
Figura 6.17. Método dos pontos de interseção (Verhasselt, 1961).....	61
Figura 6.18. Método dos pontos de interseção (Zăvoianu, 1978).....	61
Figura 6.19. Modelos estocásticos de agregação.....	63
Figura 6.20. Redes de drenagem baseadas em algoritmos de otimização de energia.....	64
Figura 7.1. DF do Brasil e suas regiões administrativas, área urbana e reservatórios artificiais.....	66
Figura 7.2. Perfis típicos (modificado de Martins, 1998) e distribuição geomorfológica da região.....	67
Figura 7.3. Domo. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	67
Figura 7.4. Esquerda: Esquema da escarpa.....	68
Figura 7.5. Esquerda: Esquema dos planaltos.....	68
Figura 7.6. Relevo dobrado. Fonte: Suertegaray <i>et al</i> , 2003.....	69
Figura 7.7. Vales de dissecção no DF. Fonte: Souza, 1998b.....	69
Figura 7.8. Carta de altimetria do DF. Fonte: Terracap (2010).....	70

Figura 7.9. Carta de declividade do DF, estimado a partir do mapa de altimetria.	71
Figura 7.10. Carta Geomorfológica do DF. Modificado de Novaes (1994)	72
Figura 7.11. Distribuição do substrato rochoso do DF	73
Figura 7.12. Carta litológica do DF. Modificada de Freitas-Silva & Campos (1998).	74
Figura 7.13. Distribuição do substrato pedológico na região.	75
Figura 7.14. Carta de solos do DF.....	77
Figura 7.15. Biomas do Brasil.....	78
Figura 7.16. Bioma do cerrado	78
Figura 7.17. drenagem dendrítica; Gama, DF.....	79
Figura 7.18. Drenagem paralela. Lago Norte, DF.....	79
Figura 7.19. Drenagem anelar. Plano Piloto do DF	80
Figura 7.20. Drenagem em treliça; Ceilândia, DF.	80
Figura 7.21. Drenagem desértica. Sobradinho, DF	80
Figura 7.22. Sistemas de drenagens híbridos	80
Figura 7.23. Carta hidrográfica do DF. Fonte: Terracap (2010).	82
Figura 7.24. Carta hidrogeológica do domínio poroso do DF. Fonte: Freitas-Silva & Campos (1998).	83
Figura 7.25. Carta hidrogeológica do domínio fraturado do DF. Fonte: Freitas-Silva & Campos (1998).	84
Figura 8.1. Esquema metodológico.	87
Figura 9.1. Perfil extraído para determinar o tamanho de pixel.....	88
Figura 9.2. Espectro multifractal de uma sub-região aleatória da rede de drenagem.....	90
Figura 9.3. Hierarquias do sistema de geoformas na região.....	91
Figura 9.4. Sistema hierárquico repartido em três níveis.	91
Figura 9.5. Exemplos da densidade de drenagem	93
Figura 9.6. Histograma de frequências da rugosidade (esquerda) e da densidade de drenagem (direita).....	93
Figura 9.7. Re-classificação da rugosidade.	94

Figura 9.8. Re-classificação da densidade de drenagem.....	94
Figura 9.9. Carta de rugosidade do terreno do DF.	95
Figura 9.10. Carta de densidade de drenagem do DF.	96
Figura 9.11. Comparação de resultados usando diversos estimadores da rugosidade	97
Figura 9.12. Amostragem de dados para a validação estatística.....	98
Figura 9.13. Carta do potencial de infiltração estimada mediante tabulação cruzada	104
Figura 9.14. Carta do potencial de infiltração estimada mediante fórmula analítica.	107
Figura 9.15. Algoritmo de interpolação fractal do DPM.....	108
Figura 9.16. Histograma de frequências	109
Figura 9.17. Redes de drenagem geradas no Spring®	110

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

a – Constante de ajuste regional da relação infiltração - densidade de drenagem - rugosidade

A - Área da região para estimar a resolução de pixel ótima

A_d - Área de drenagem

A_b - Área da bacia

A_c - Área de uma circunferência cujo perímetro equivale ao perímetro da bacia do caso

A_r - Área real da bacia

A_m - Área da bacia projetada no mapa

b - Constante de ajuste regional da relação infiltração - densidade de drenagem - rugosidade

B – Largura da bacia

CAD – *Computer Aided design* (Projeto assistido por computador)

D – Densidade de drenagem

D_c - Diâmetro de uma circunferência cuja área equivale à área da bacia do caso

D_{can} - Densidade de canais

DF – Distrito Federal

D_f – Dimensão fractal

D_H - Dimensão de Hausdorff

DPM – Deslocamento do Ponto Médio

DSM – *Digital Soil Mapping* (Mapeamento digital de solos)

D_q – Dimensões de Renyi

E – Escala

$E[x]$ – Valor esperado da variável x

ENT – Entropia do relevo

$f(a)$ – Espectro multifractal

fBm – Movimento fractal Browniano

GPS – *Global Positioning Systems* (Sistemas de posicionamento global)

b – Comprimento (projeção unidimensional) das unidades que formam o fractal

b_i – Nivel de cinza no i -ésimo pixel

H – Coeficiente de Hurst

H_s - Coeficiente de Sinuosidade hidráulica

HSI - Proporção de sinuosidade hidráulica

k – Grau de alongamento

K_s - Coeficiente de sinuosidade do rio

l - Largura do trajeto para o cálculo da resolução de pixel ótima

L_a - Menor distância do canal em linha reta

L_c - Comprimento do canal medido ao longo do seu curso

l_b - Comprimento (projeção unidimensional) do fractal

L_m - Largura da bacia

L_{map} – Comprimento do rio no mapa

L_r - Comprimento do rio corrigido

m – Coeficiente de compactação da bacia

MDT – Modelo Digital do Terreno

$n(\delta z)$ - Número de pontos de inflexão observado para estimar a resolução de pixel ótima

N - Quantidade de unidades que formam o fractal

N_{can} - Número de segmentos de canais

N_{cel} - Número de células usadas no método *Box-counting*

$N(h)$ - número de pares considerados na análise do semivariograma

p – Tamanho de Pixel

P- Perímetro da bacia

PUCE – *Pattern Unit Component Evaluation*

RC – Razão de circularidade

R_e – Razão de alongamento

R_f – Fator de forma

Rug - Rugosidade

SGBD – Sistemas de Gerenciamento de Bases de Dados

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SSR – Sistemas de Sensores Remotos

TIN – *Triangular Irregular Network*

T_s - Coeficiente de sinuosidade topográfica

TSI - Proporção de sinuosidade topográfica

x – Coeficiente de infiltração

$Z(x)$ - Elevação no ponto x

α - Declividade média do canal de drenagem

α_q – Singularidades multifractais

$\gamma(h)$ - Semivariância

λ – Índice de Lacunaridade

λ_{alt} – Lacunaridade da altura

λ_{decl} – Lacunaridade da declividade

σ_{alt} – Desvio padrão da altura

σ_{decl} – Desvio padrão da declividade

τ_q – Expoentes de massa

1. INTRODUÇÃO

A cartografia geotécnica é uma ferramenta necessária para o reconhecimento do meio físico em função das obras de engenharia. Um dos seus principais objetivos consiste em fornecer cartas mostrando a compartimentação do terreno em termos de atributos tangíveis para a engenharia, a fim de conhecer as características, recursos, potenciais e limitações de uma determinada região.

Uma observação perceptível na cotidianidade do trabalho cartográfico é a complexidade geométrica do relevo, a qual é derivada de um conjunto complexo de vetores, principalmente da história tectônica, da estruturação litológica e da história climática da zona em questão; tais fatos são estudados pela geomorfometria, já que a superfície do relevo alude aos aspectos já mencionados, ou em outras palavras, “a forma reflete o fundo”.

O surgimento de teorias que contemplam a complexidade intrínseca dos sistemas naturais (tais como a geometria fractal), conjugado com o avanço de paradigmas computacionais (por exemplo, sistemas de informações geográficas - SIG e processamento digital de imagens), elucidam um amplo caminho para a proposição de novas metodologias de mapeamento geotécnico, como alternativas às correntes tradicionais. Assim, a textura e os padrões de drenagem encontrados no relevo (ambos interpretáveis quantitativamente desde a visão dos fractais) geram interesse devido que refletem as propriedades do substrato litológico superficial.

A anterior colocação permite afirmar que o uso conjugado de SIG, processamento digital de imagens, cartografia geotécnica e geometria fractal, têm o potencial de reconhecer a distribuição espacial do embasamento geológico, partindo de imagens digitais que contenham informação sobre a textura e os padrões de drenagem presentes no relevo; esta afirmação é a luz que motivou esta pesquisa, cujo desenvolvimento será apresentado a seguir.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com a grande explosão de tecnologias de informação e computação, apareceu uma vasta quantidade de dados e ferramentas nas ciências da terra. O desafio de entender grandes pacotes de dados permitiu o desenvolvimento de novos paradigmas estatísticos

como a mineração de dados ou a inteligência artificial; adicionalmente, o incremento das capacidades de ferramentas como SIG, GPS, sensores remotos (e próximos) e fontes de dados (como os modelos digitais de elevação) permitem novos rumos de trabalho que, por fortuna, coincidem com uma demanda global de informação cartográfica para o monitoramento e modelagem ambiental. De acordo com McBratney *et al* (2003) e Lagacherie (2006), vários são os pontos nevrálgicos para serem reforçados, face aos novos desafios cotidianos do trabalho em cartografia, especialmente na geotecnia:

- Criar locais para pesquisas em cartografia e acoplar seus produtos com os serviços cartográficos existentes;
- Desenvolver sistemas de inferência de dados;
- Estimular a sinergia entre os conhecimentos geológicos e a modelagem geotécnica, de forma especializada;
- Abordar as variações multi-escala dos parâmetros geotécnicos;
- Lidar com a evolução dos parâmetros geotécnicos no tempo (pelo menos com aqueles que são monitorados extensivamente);

De maneira geral, o zoneamento geotécnico proporciona conhecimento sobre as características básicas do meio físico, facilitando a gestão do território com critérios técnicos. Este fato é de interesse para a conservação dos ecossistemas, exploração dos recursos minerais, planejamento territorial, administração do risco e cartografia em geral. Mesmo que as metodologias de zoneamento tradicionais intuem a complexidade inerente aos processos naturais, ainda não há consenso sobre a visão matemática/filosófica mais satisfatória que aborde este fato de maneira quantitativa (Guy, 1966; Soares & Fiori, 1978; Christofolletti, 1999; Huaxing, 2008; Hengl & Reuter, 2009).

A geometria fractal se apresenta como uma alternativa que oferece parâmetros quantitativos que satisfaçam a compreensão da estrutura geométrica dos fenômenos naturais, que neste caso, traduzir-se-á em interpretações geotécnicas mapeadas espacialmente. Sendo um fato conhecido que a natureza dos dados geográficos pode ser interpretada desde o paradigma fractal (Mandelbrot, 1967; Longley *et al*, 2005; Hengl & Reuter, 2009), este trabalho encara diretamente dois desafios propostos; a inferência de dados (geometria fractal como proposta de interpretação de dados secundários para criar

nova informação) e as variações multi-escala (estudo da auto-similaridade do terreno); no marco da vanguarda das metodologias cartográficas.

Acredita-se que o fomento deste tipo de pesquisas impulse o refinamento das metodologias de zoneamento visando abranger a conceituação da complexidade intrínseca dos fenômenos naturais.

1.2 OBJETIVOS

O escopo final desta pesquisa é desenvolver novo conhecimento de aplicação prática na cartografia geotécnica e de utilidade para o Distrito Federal do Brasil, baseado no paradigma da geometria fractal. Também há vários objetivos específicos associados ao objetivo geral:

- Estabelecer um estado da arte do tema;
- Analisar as variações multi-escala do sistema geomorfológico do Distrito Federal do Brasil (DF)
- Utilizando os conceitos da dimensão fractal, elaborar no mínimo, uma carta de densidade de drenagem e uma carta de rugosidade do terreno do DF na escala 1:10.000;
- Estabelecer relações entre variáveis do meio físico (substrato litológico, solos, declividade, entre outras) e a dimensão fractal;
- Gerar uma proposta de inferência de dados;
- Simular terrenos e redes de drenagem que sejam semelhantes às condições do DF, baseados em algoritmos de interpolação fractal;

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente dedicou-se esforços na compreensão teórica da geometria fractal até adquirir um domínio integral do tema (ou seja, até ter a capacidade de abordar qualquer tópico desde o ponto de vista dos fractais); procedeu-se logo na depuração bibliográfica de relevância à pesquisa, a fim de conhecer o estado da arte e definir os objetivos e métodos concretos para o trabalho. Após de estabelecer o estado da arte, definiu-se a seguinte sequência de passos para atingir o objetivo:

- Arranjo da base cartográfica: Obteve-se a base cartográfica do DF atualizada para 2010, fornecida pela empresa Terracap; esta foi complementada com informações de outras bases cartográficas disponíveis, depurada e formatada segundo os interesses da pesquisa;
- Zoneamento baseado na dimensão fractal: De acordo com os potenciais e limitações da base cartográfica, e segundo as considerações surgidas no estado da arte, procedeu a se desenvolver e aplicar técnicas de mapeamento baseado na dimensão fractal da rugosidade do relevo e dos padrões de drenagem;
- Análise estatística: Analisou-se a relação entre os parâmetros propostos e outras variáveis do meio físico;
- Simulação de relevos e drenagens fractais: Conforme a revisão bibliográfica foram programados algoritmos de interpolação fractal para gerar relevos e drenagens artificiais;

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Para facilitar o acompanhamento do trabalho, o documento foi dividido em dez capítulos; o capítulo 1 introduz a relevância, escopo e motivação da pesquisa, assim como também resume a metodologia adotada para atingir os objetivos propostos; Os seguintes cinco capítulos compõem a revisão bibliográfica, estabelecendo os conceitos sobre cartografia geotécnica, geoprocessamento, geometria fractal e geomorfometria, de interesse para o desenvolvimento do trabalho; o capítulo 7 caracteriza o meio físico do Distrito Federal do Brasil (área de estudo); o capítulo 8 descreve em detalhe os materiais e métodos implementados; os capítulos 9 e 10 apresentam, respectivamente, os resultados e conclusões das análises feitas. O trabalho fecha com a revisão bibliográfica e anexa os códigos computacionais desenvolvidos.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

Segundo Pérez & Pérez (2004) pode-se definir a cartografia como o conjunto de operações científicas e técnicas que intervêm na formação ou análise de mapas, modelos em relevo ou globos que representem a terra, parte dela ou qualquer parte do universo. A Associação Cartográfica Internacional define o conceito de mapa como a representação convencional gráfica de fenômenos concretos ou abstratos, localizados na terra ou em qualquer parte do universo, sendo este um produto esquemático; o conceito de “carta” se refere a produtos derivados e sistemáticos.

A seguir serão revisados alguns conceitos básicos sobre cartografia geotécnica necessários para a abordagem desta pesquisa; para um aprofundamento nos temas aqui citados, sugere-se complementar a leitura com os trabalhos de Zuquette & Gandolfi (2004), Gomasca (2004) ou Pérez & Pérez (2004).

2.1 PROJEÇÕES CARTOGRÁFICAS

As massas internas da terra, sua distribuição e densidade não são homogêneas, assim, a forma de equilíbrio dessa massa fluindo segundo as leis de gravitação universal é chamada de *Geóide* (Figura 2.1a), a qual é parecida com uma batata, porém é aproximada mediante elipsóides para fins de cálculos cartográficos (Figura 2.1b).

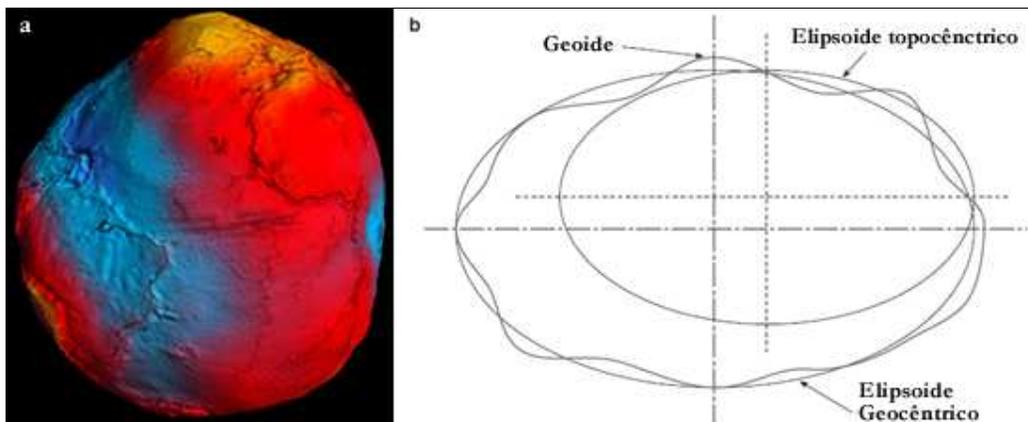


Figura 2.1. A forma da terra: a) Geoide segundo o satélite GOCE; b) Interpretação elipsoidal do geóide para fins cartográficos

Para fins de mapeamento, além da abstração anteriormente mostrada (converter um geóide num elipsóide), se faz necessário projetar o elipsóide num plano, para o qual há muitas propostas disponíveis na literatura; tal vez a mais usada (pelo menos nas regiões equatoriais) seja a projeção Transversa de Mercator (Figura 2.2), porém, dependendo da região, cada projeção irá acarrear distorções geométricas segundo cada caso particular, assim a escolha de uma ou outra projeção será em função dos possíveis erros geométricos.

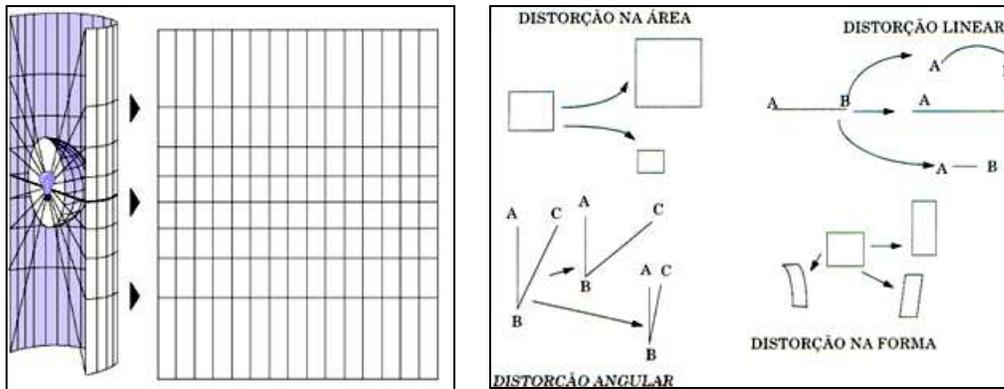


Figura 2.2. Projeção Transversa de Mercator (esquerda) e as possíveis distorções durante a projeção (direita)

As projeções são a maneira de representar a superfície do terreno nos mapas usados pela cartografia geotécnica; este trabalho baseou-se na projeção Transversa de Mercator, devido que propicia a conservação das propriedades geométricas dos objetos nas regiões equatoriais (caso do DF), detalhes sobre esta e outras projeções não serão abordados neste trabalho, porém estão facilmente acessíveis na literatura citada ao início do capítulo.

2.2 CONCEITO BÁSICO DE ESCALA

O primeiro parâmetro a ser definido numa proposta cartográfica é a escala de trabalho, a qual está relacionada com a magnitude do detalhe e cobertura abrangida pelo mapa. Numericamente, é possível definir a escala (E) segundo a Equação 2.1, desta maneira, uma escala 1:10.000 indica que 1cm no papel representa 10.000cm (ou 100m) no terreno, e assim por diante:

$$E = (\text{Distância no mapa})/(\text{Distância no terreno}) \quad (2.1)$$

O conceito da escala já foi motivo de confusão na comunidade científica (Longley *et al*, 2005), pois, para um cartógrafo, uma escala grande corresponde a uma fração representativa (usualmente uma área pequena com boa resolução de detalhe), o qual é

exatamente oposto ao que os cientistas da biologia e das humanidades entendem por estudos de grande escala (uma área de trabalho grande, usualmente com resolução de detalhe fraca). A fim de evitar esse tipo de confusões, esclarece-se que este trabalho adotou a concepção dos cartógrafos.

Costuma-se associar um fator de escala à magnitude espacial do trabalho em questão, assim, há diversas propostas na literatura para classificar a escala de trabalho em função do projeto, algumas ilustradas a seguir (Tabelas 2.1 até 2.5):

Tabela 2.1. Tipos de mapas em função da escala (Dearman, 1991)

Mapa	Geral	Pequena escala	Mediana escala	Grande escala
Escala	< 1:500.000	1:200.000 – 1:100.000	1:50.000 – 1:25.000	>1:10.000

Tabela 2.2. Resoluções, escalas e extensões sugeridas para mapas digitais (Modificada de McBratney *et al*, 2003). *Tamanho de pixel no modelo digital do terreno

Tamanho de Pixel*	Escala Cartográfica	Extensão
< (5x5)m	>1:5.000	<(50x50)km
(5x5)m – (20x20)m	1:5.000 – 1:20.000	(50x50)km – (200x200)km
(20x20)m - (200x200)m	1:20.000 – 1:200.000	(2x2)km – (2000x2000)km
>(200x200)m	<1:200.000	>(2000x2000)km

Tabela 2.3. Escalas de trabalho segundo o tipo de mapa (Gomarasca, 2004)

Mapa Temático	Escala
Cadastro	1:1.000 – 1:4.000
Projeto	1:2.000 – 1:10.000
Planejamento territorial	Variável
Pesquisa	Variável
Atlas	>1:1.000.000

Tabela 2.4. Ordens de grandeza em função da cobertura do projeto (MMA/SDS, 2001)

Abrangência territorial	Ordens de Grandeza
Continental	1:10.000.000 – 1:5.000.000
Nacional	1:2.500.000 – 1:10.000.000
Regional	1:1.000.000 – 1:250.000
Estadual	1:250.000 – 1:100.000
Municipal	1:100.000 – 1:50.000
Local	1:25.000 – 1:1000

Tabela 2.5. Escalas de zoneamento de deslizamentos e suas aplicações segundo Fell, *et al* (2008).

Escala	Variação	Exemplos de Zoneamento	Área Típica de Zoneamento
Pequena	<1:100.000	Inventário de deslizamentos e de susceptibilidades para informações a seguros e ao público em geral.	>10.000km ²
Média	1:100.000 a 1:25.000	Inventário de deslizamentos e zoneamento de susceptibilidades para desenvolvimento regional ou para projetos de engenharia em larga escala. Nível preliminar de mapeamento do perigo para áreas locais.	1.000 a 10.000km ²
Larga	1:25.000 a 1:5.000	Inventário de deslizamentos, zoneamento da susceptibilidade e do perigo para áreas locais. Zoneamento do perigo em nível avançado a intermediário para desenvolvimento regional. Zoneamento do risco em nível preliminar a intermediário para áreas locais e estágio avançado de obras de engenharia, rodovias e ferrovias.	10 a 1.000km ²
Detalhe	>1:5.000	Zoneamento do perigo em nível intermediário a avançado e zoneamento do risco para áreas específicas e projetos de obras de engenharia, rodovias e ferrovias.	Vários hectares a 10km ²

2.3 CARTAS GEOTÉCNICAS

Uma carta geotécnica é um tipo de mapa geológico que fornece uma representação generalizada de todos os componentes do ambiente geológico de importância no planejamento do uso da terra, e em projetos, construção e manutenção aplicada a obras civis e de mineração (UNESCO/IAEG, 1976). As feições geológicas representadas nas cartas geotécnicas são:

- Caráter das rochas e solos (classificação, composição, comportamento mecânico, etc.);
- Condições hidrogeológicas (Tipo de aquífero, vazão, etc.);
- Condições geomorfológicas (Classificação, relevo típico, etc.);
- Fenômenos geodinâmicos (Instabilidade de encostas, processos erosivos, subsidência do terreno, etc.);
- Cartas complementares (Documentos auxiliares, perfis, etc.);

Também existem cartas derivadas sistematicamente dos produtos principais anteriormente citados, tais como adequabilidade para fundações, materiais de construção, ameaças geotécnicas, entre outras.

Dependendo da finalidade, as cartas podem ser de variada extensão, escala e detalhe; podem ter diferentes conteúdos e uma variada escolha dos atributos mapeados, como também diferentes aspectos da sua avaliação. Elas podem ser úteis nas primeiras etapas do planejamento, como também nos estágios finais, mostrando que a distribuição e relações espaciais dos componentes básicos podem refletir na história e na dinâmica do desenvolvimento das condições geotécnicas, permitindo prognosticar a influência do ambiente na obra, como também prever os aspectos nos quais a obra interferirá com o ambiente. Logicamente, tais mapas não substituem uma investigação detalhada local, mas poderão auxiliar na projeção da investigação local e na interpretação dos resultados.

2.3.1 ABORDAGEM ANALÍTICA

Partindo de uma base cartográfica multitemática, onde cada plano de informação representa uma variável espacializada (mapa), é possível estabelecer relações entre as variáveis para estimar nova informação. Uma maneira de estabelecer as relações é mediante uma lei matemática conhecida, assim, por exemplo, Romão & Souza (2007) estimaram um

mapa de entropia do relevo do município de Goiânia (GO, Brasil), usando equações matemáticas fundamentadas na termodinâmica (Figura 2.3).

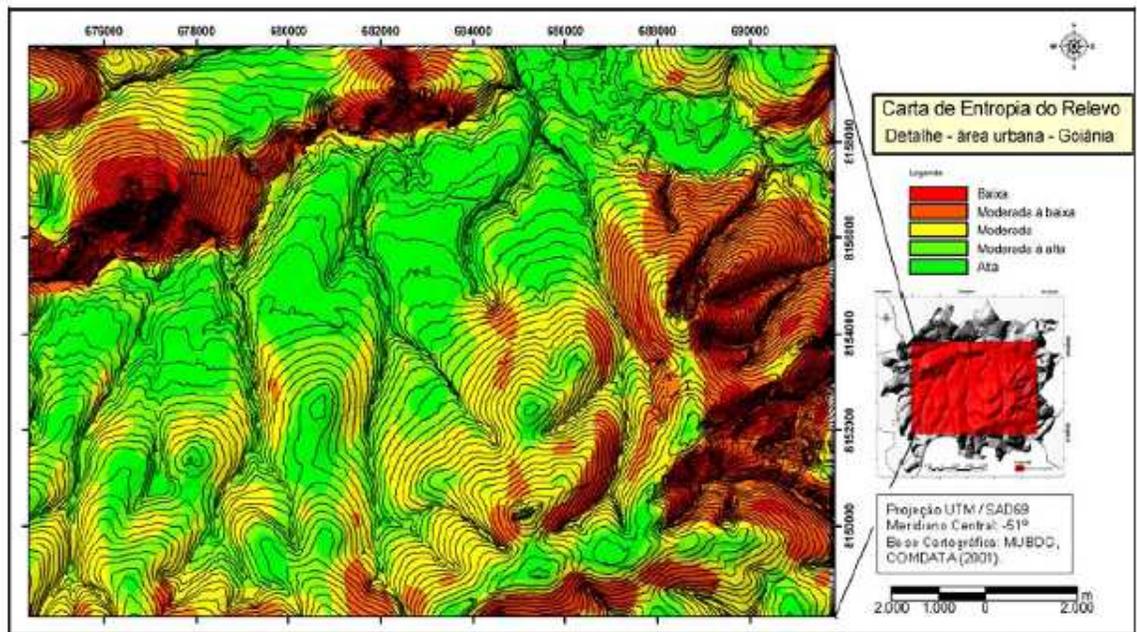


Figura 2.3. Abordagem analítica mediante modelos matemáticos conhecidos; carta de entropia do relevo no município de Goiânia, GO, Brasil (Romão & Souza, 2007)

Geralmente não se conhecem leis matemáticas para relacionar variáveis de face ao processo de mapeamento; nesse caso existe outra forma de abordagem analítica conhecida como “álgebra de mapas”, onde as matrizes que contêm os mapas são processadas mediante operações algébricas, atribuindo pesos de importância às variáveis. Por exemplo, Souza (1998a) obteve um mapa classificando a área do DF segundo a aptidão para a disposição de resíduos sólidos urbanos (Figura 2.4), mediante a álgebra de variáveis tais como a declividade, distância de unidades hidrográficas, distância de áreas urbanas, distância de aeroportos, tipo de solo, espessura dos solos, profundidade do nível da água, tipo de embasamento rochoso, restrições ambientais, entre outras; determinando os pesos de importância mediante lógica booleana, lógica difusa ou técnicas de inteligência artificial.

A álgebra de mapas permite examinar critérios sociais, físicos, biológicos, psicológicos, entre outros, para operar informações que permitam zonar uma região para determinados fins.

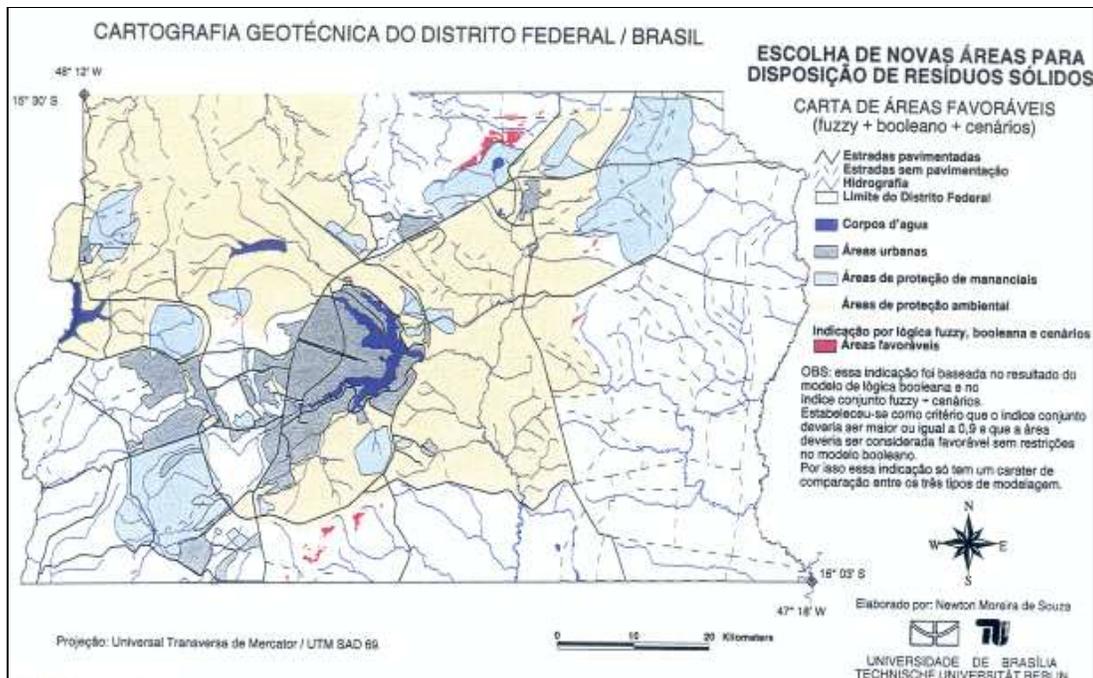


Figura 2.4. Abordagem analítica mediante álgebra de mapas; carta de aptidão para disposição de RSU no DF (Souza, 1998a)

2.3.2 ABORDAGEM SINTÉTICA

Também conhecida como avaliação de terreno, baseia-se na identificação e análise das feições do relevo. Portanto, nesse processo são obtidas unidades de terreno com base na análise dos padrões fisiográficos do relevo e a partir do emprego das técnicas de fotointerpretação aplicadas em dados de sensoriamento remoto. Com o surgimento dos trabalhos de fotointerpretação, a técnica de avaliação de terreno se popularizou, passando a ser utilizada em inúmeros trabalhos com diversas finalidades. Essa técnica influenciou inúmeras metodologias, com destaque para a metodologia PUCE (Grant, 1965; citado por Zuquette & Gandolfi, 2004) e outras que não serão consideradas neste documento.

2.4 ZONEAMENTO GEOTÉCNICO

Consiste em avaliar e classificar unidades territoriais individuais com base na uniformidade de suas condições geotécnicas, partindo de esquemas simplificados dos componentes que tem importância significativa à geotecnia.

As unidades são caracterizadas por certo grau de homogeneidade nas propriedades geotécnicas básicas (o qual depende da escala e finalidade do mapa), porém há um inconveniente em determinar as características do substrato litológico, devido à

variabilidade regional das propriedades das rochas e solo e por não existirem métodos e técnicas para a determinação rápida e de baixo custo capaz de fornecer dados em quantidades suficientes. Existem já varias metodologias propostas para efetuar o zoneamento geotécnico, a seguir, comenta-se sobre as mais destacadas; outras metodologias não abordadas neste trabalho podem ser consultadas em Zuquette & Gandolfi (2004) ou Roque (2006).

2.4.1 IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO)

Os conceitos e a abordagem da metodologia IPT foram desenvolvidos em 1995 (por Prandini *et al.*, 1995; citados por Zuquette & Gandolfi, 2004), os produtos são agrupados em várias categorias:

- Cartas geotécnicas (propriamente ditas): Expõem limitações e potencialidades dos terrenos e definem diretrizes de ocupação para um ou mais usos do solo;
- Cartas de suscetibilidade: Têm gradações de probabilidade de desencadeamento de um ou mais fenômenos naturais ou induzidos pela ocupação;
- Cartas de risco: Destacam a avaliação de dano potencial à ocupação, diante de uma ou mais características ou fenômenos naturais ou induzidos por essa mesma ocupação;
- Cartas de atributos ou parâmetros: Limitam-se à distribuição espacial de uma ou mais características do terreno.

2.4.2 PUCE (*Pattern Unit Component Evaluation*)

Deu-se início na Austrália (Grant, 1965; citado por Zuquette & Gandolfi, 2004) e está centrada na divisão da área em classes de terreno hierarquizadas a partir de características geológico/geomorfológicas, geotécnicas e uso do solo, ou seja, pode ser compartimentada em áreas com os mesmos padrões típicos de formas de relevo (para cada unidade de terreno) e adequados à escala de estudo. Os terrenos são divididos em quatro classes hierárquicas denominadas província, padrão, unidades e componentes do terreno (Tabela 2.6)

Tabela 2.6. Sistema PUCE

Classes do Terreno	Fatores para descrição	Fatores para quantificação
Província	Área com geologia constante. Escalas inferiores a 1:250.000, em estudos de viabilidade e planejamento regional	-
Padrão	Conjunto de formas do relevo	Amplitude de relevo, densidade de drenagem
Unidade	Unidade de relevo, solos, rochas e formações vegetais	Detalhamento das superfícies topográficas, perfis dos solos, comunidades vegetais e cobertura do solo.
Componente	Talude, litologia, solos, vegetação	Detalhamento das superfícies topográficas com curvaturas constantes, perfis dos solos, comunidades vegetais e condições hidrogeológicas.

Resumindo, o sistema PUCE baseia-se na delimitação das feições da paisagem facilmente reconhecíveis, tendo com fundamento os seus atributos (relevo, substrato rochoso, vegetação e solo), identificados a partir de suas características geomórficas (declividade, litologia e estruturas). A classificação do terreno é feita por meio de fotointerpretação e pelos trabalhos de campo. O número de pontos amostrados é reduzido.

2.4.3 IAEG (*International Association for Engineering Geology*)

Na década dos 70, a comissão de cartografia geotécnica da IAEG concebeu uma metodologia orientada para o mapeamento geotécnico adequado para a maioria dos países e cuja aplicação fosse viável técnica e economicamente. As principais técnicas contempladas para a realização do trabalho são fotogeologia, métodos geofísicos, sondagens, amostragens, ensaios *in situ* e laboratoriais; além, abrange as formas de

apresentação dos resultados e como interpretá-los para os fins desejados. O detalhamento desta metodologia é amplo e encontra-se disponível, por exemplo, nos trabalhos da UNESCO/IAEG (1976), Dearman (1991), Zuquette & Gandolfi (2004) ou Roque (2006).

2.4.4 MÉTODO DAS MATRIZES

Quando o número de objetos e atributos envolvidos não é pequeno, o uso de matrizes para visualizar os dados é útil para construir ou analisar classificações. Na Figura 2.5, as relações entre os correspondentes objetos e atributos podem ser representadas por símbolos (a,b,c,...,etc.), sistemas binários tipo 0 ou 1 (valores nominais indicando a presença ou ausência da relação) ou qualquer valor numérico dependendo do caso. Este esquema de representação permite associar relações mediante o pareamento fila-coluna e também facilita a análise estatística dos dados; representa a base conceitual dos atuais mecanismos de análise espacial usados pelos SIG (Dearman, 1991).

Unidades do mapa	Atributos					
	1	2	3	4	5	6
A	10	2100	-3.5	a4	0.25	0
B	15	300	+1.2	b4	0.32	1
C	13	1050	-0.6	c4	0.06	1
D	12	1700	n.a	d4	0.00	0
E	18	900	+2.6	e4	0.30	1

Figura 2.5. Matriz relacional

2.4.5 MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS (DSM)

A gestão dos recursos do solo possui limitações para realizar extenso trabalho de campo e análise de laboratório. Com o surgimento dos SIG, apareceram novas tendências que atualizaram e melhoraram os conhecimentos clássicos em função do constante avanço tecnológico. O mapeamento digital de solos (ou DSM – *digital soil mapping*) pode ser definido como a criação de sistemas de informação espacial do solo mediante modelos numéricos, inferindo as variações espaciais e temporais das propriedades dos solos (Lagacherie, 2006). O DSM focaliza em vários aspectos:

- Criação de bases de dados de amostragens de solos;
- Processamento e produção de novos dados;
- Desenvolvimento de modelos numéricos para a predição do solo;

- Avaliação da qualidade de mapas digitais de solos;
- Representação de mapas digitais.

Este paradigma entende a cartografia de solos como uma estratégia científica fundamentada nos conceitos dos fatores genéticos dos solos, acoplado às interações com o meio ambiente; visando ajustar relações quantitativas e predizer mapas digitais (McBratney *et al*, 2003).

3. NOÇÕES SOBRE GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento (ou geomática) é o paradigma que mais auxilia os processos cartográficos na atualidade; pode ser definido como um conjunto de técnicas para o tratamento de informação espacial, justapondo ferramentas como os sistemas de informação geográfica (SIG), projeto assistido por computador (CAD), sistemas de gerenciamento de base de dados (SGBD), sistemas de sensores remotos (SSR), procesamento digital de Imagens, entre outros. Informação ampliada sobre as técnicas de geoprocessamento (aquisição, pre-processamento, processamento, classificação, visualização, etc.) podem ser esclarecidas nos trabalhos de Gomarasca (2004), Longley *et al* (2005), Russ (2007) ou Hengl & Reuter (2009) entre outros.



Figura 3.1. Geralização sobre uso do geoprocessamento neste trabalho. Modificado de Hengl & Reuter (2009)

O procedimento geral das aplicações em geoprocessamento dependem de cada caso específico. A Figura 3.1 esboça o geoprocessamento aplicado neste trabalho. Para efeitos de contextualização, a seguir serão discutidos genericamente os conceitos sobre geoprocessamento mais necessários para uma adequada compreensão dos procedimentos implementados neste trabalho.

3.1 ESTRUTURAS DE DADOS

Nos SIG há duas estruturas básicas para representar objetos ou atributos, chamadas *raster* (ou matricial) e vetorial; como consequência desta dicotomia, há diferentes tipos de SIG e diferentes tipos de análises, orientados à efetividade com um ou outro tipo de dado. A seguir serão descritas ambas estruturas de dados:

3.1.1 VETORIAL

Este modelo incorpora discretamente a geometria e a localização dos objetos geográficos e seus atributos. Por conveniência, a informação dos atributos geralmente é acessada por meio de tabelas. Cada elemento vetorial tem um único código identificador e vários atributos textuais ou numéricos, de maneira que o elemento pode ser simbolizado de acordo com algum dos seus atributos (Figura 3.2).

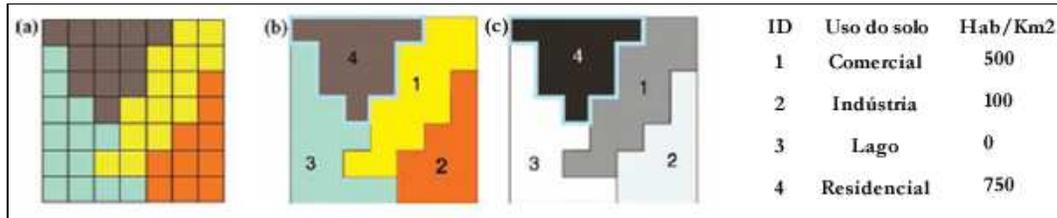


Figura 3.2. Modelo simples representado em vários formatos: (a) *raster*; (b) vetorial com valores nominais (Uso do solo); (c) vetorial com valores ordinais (Hab/km²).

Esta associação da geometria com atributos tabulares é chamada de “estrutura de dados georelacional” e não há limite na quantidade de informação que pode ser guardada ou associada a algum objeto em particular.

3.1.2 MATRICIAL

De acordo com Hengl & Reuter (2009), a maioria das aplicações geomorfométricas usam grades retangulares para formatar os dados dos modelos digitais do terreno (MDT). Esta estrutura baseia-se num arranjo retangular de linhas e colunas espacialmente referenciadas, projetando a realidade num sistema ortogonal onde todos os nós da grade (também chamados de pixels ou células de informação) são do mesmo tamanho (Figura 3.3).

As células de informação contém valores numéricos que representam a variação dos atributos do terreno (por exemplo, elevação, declividade, dimensão fractal, etc.), sendo visualizados segundo escalas de cores ou níveis de cinza. A Figura 3.3 (direita) mostra um

esquema *raster* para representar valores altimétricos numa região, os quais estão expressos em metros.

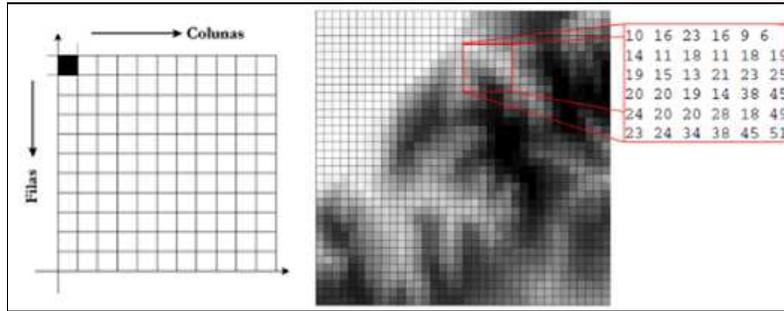


Figura 3.3. Estrutura *raster*

A vantagem de estruturar os MDT em formato *raster* é a simplicidade da estrutura, a qual facilita a implementação de algoritmos geomorfométricos e a visualização de mapas. Conhecem-se algumas desvantagens, por exemplo, as grades sub-amostram a topografia em áreas onde o relevo é complexo, e sobre-amostram em topografias suaves; também as distâncias entre os centros dos nós nas direções cardinal e diagonal podem acarrear impacto negativo na precisão dos modelos.

3.1.2.1 TAMANHO DE CÉLULA

A distância entre dois nós da grade *raster* (geralmente expresso em metros) define a maioria das características técnicas de um MDT. O tamanho de célula está estreitamente relacionado com o nível de detalhe ou precisão espacial do mapa (Figura 3.4), a qual, em cartografia, está relacionado com o conceito de escala. Como uma regra geral, o tamanho de célula deveria ser igual a 0.5mm no papel do mapa (McBratney *et al*, 2003; Hengl & Reuter, 2009), ou seja, uma resolução de pixel de 5m corresponderia uma escala de 1:10.000 no mapa.

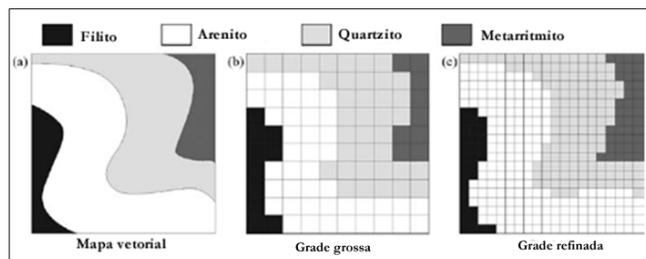


Figura 3.4. Efeito da resolução do *raster* na precisão da representação

O problema chave ao selecionar um tamanho de célula para aplicações na geomorfometria é que pode ter diferenças significativas entre a superfície de elevação interpolada e a superfície do terreno real, implicando que alguns canais e cumes poderiam ser distorcidos ou mesmo até desaparecer. A Figura 3.5 ilustra o efeito da resolução na representação topográfica, um tamanho de célula refinado ($p=0.5\text{m}$) será mais efetivo do que um tamanho grosso ($p=2.5\text{m}$) na representação de cumes e canais

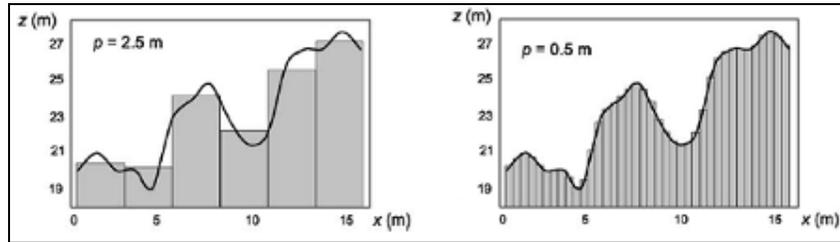


Figura 3.5. Efeito da resolução da grelha na representação da topografia

Hengl & Reuter (2009) propõem critérios para a determinação do tamanho de célula (p) para um conjunto de dados de elevação amostrado (por exemplo, pontos ou contornos), baseados na complexidade do terreno. Um deles parte da densidade dos pontos de inflexão num perfil (como o ilustrado na Figura 3.5, segundo a Equação 3.1, onde l é o comprimento do trajeto e $n(\delta z)$ é o número de pontos de inflexão observado:

$$p \leq \frac{l}{2n(\delta z)} \quad (3.1)$$

No caso 2D, partindo das curvas de nível, uma resolução apropriada pode estimar-se partindo do comprimento total dos contornos, mediante a Equação 3.2, onde A é a área da região calculada e Σl é o comprimento acumulado de todos os contornos digitalizados:

$$p \leq \frac{A}{2\Sigma l} \quad (3.2)$$

3.2 ALGORITMOS GEOMORFOMÉTRICOS

A maioria dos algoritmos geomorfométricos trabalham a partir de operações de vizinhança (também conhecidas como varredura ou convolução), um procedimento no qual é deslocada uma pequenha matriz regular (chamada de sub-grelha, janela móvel, matriz de convolução ou kernel de convolução) sobre o mapa inteiro desde o canto

superior esquerdo até o canto inferior direito, repetindo uma fórmula matemática em cada passo do deslocamento (Figura 3.6).

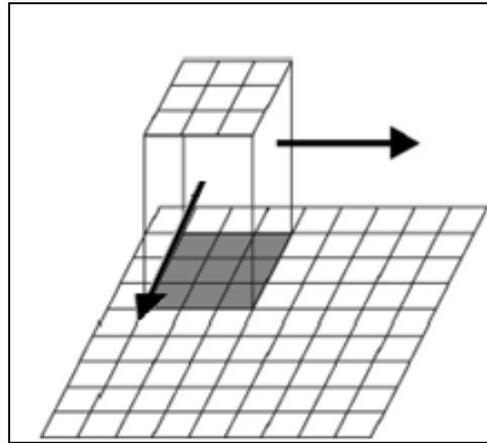


Figura 3.6 Esquema de varridura mediante uma janela móvel de 3x3

Devido que a maioria dos parâmetros da superfície terrestre variam com a escala espacial e podem ser calculados mediante diferentes algoritmos, nenhum mapa computado a partir de um MDT é definitivo. A Figura 3.7 ilustra a variação da rugosidade segundo a resolução do MDT e o tamanho da janela móvel, calculada mediante algoritmos geomorfométricos.

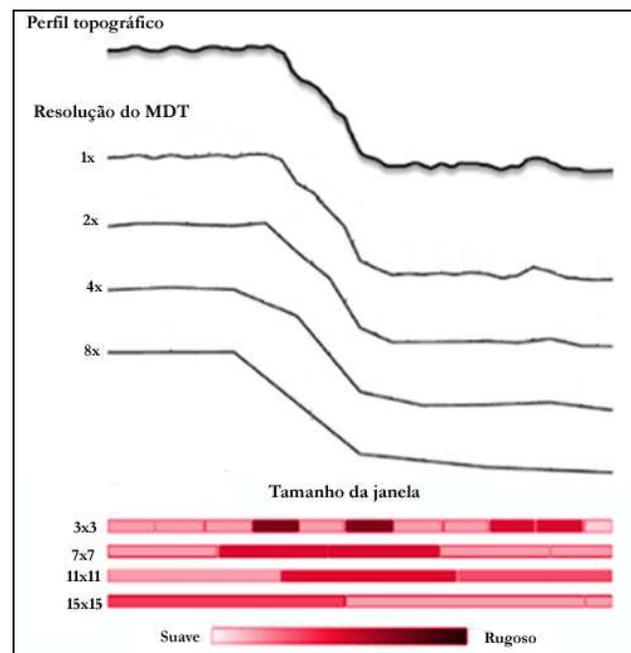


Figura 3.7. Representação da variação da rugosidade do relevo. Modificado de Grohmann *et al* (2011)

3.3 CRIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO (MDT)

A topografia digital pode ser arranjada em diversos formatos cuja estrutura básica pode ser vetorial ou *raster*. Para facilitar a aplicação de algoritmos geomorfométricos costuma-se arranjá-la numa estrutura *raster* (cada célula representa um valor de altimetria). A maioria dos programas comerciais para a manipulação de dados espaciais já incluem módulos que formatam os dados topográficos em arranjos *raster*, assim, partindo de um conjunto de curvas de nível, se faz um processo intermediário de transformação em formato vetorial TIN (*Triangular Irregular Network*) e do TIN transforma-se ao formato *raster* (Figura 3.8).

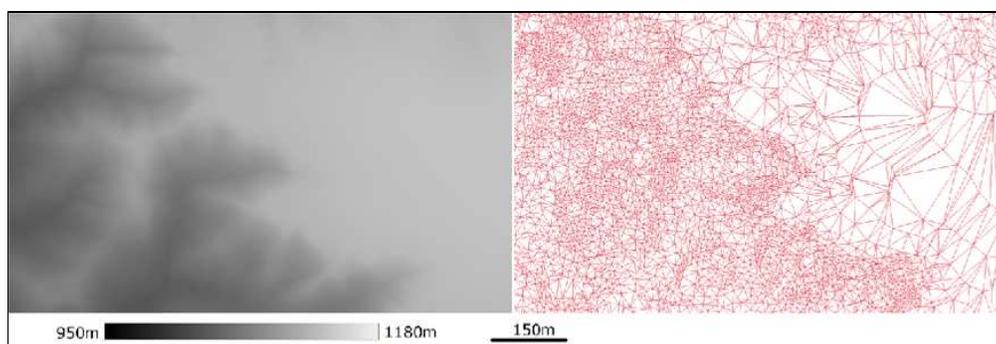


Figura 3.8. Comparação entre o MDT (direita) e o TIN (esquerda)

As curvas de nível se supõem como um dado inicial e componente da cartografia base dos projetos, de forma que existem várias maneiras para executar sua obtenção, por exemplo, mediante o levantamento direto em campo ou por meio de técnicas estereoscópicas em imagens analógicas ou digitais, entre outras.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Os conceitos principais do geoprocessamento que auxiliaram a pesquisa foram expostos sucintamente. Este esboço teórico não é suficiente para que o leitor conheça o marco geral do tema, já que este é bastante amplo e requer de revisões mais extensas (para este fim foi sugerida uma base bibliográfica no início do capítulo). Quem for trabalhar com técnicas de geoprocessamento terá vantagens ao conhecer em detalhe os formalismos matemáticos e algorítmicos que estão por trás das aplicações comerciais.

4. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE GEOMETRIA FRACTAL

¿Quanto mede o litoral do Urabá? A pergunta é inspirada pelo trabalho de Mandelbrot (1967), onde mede o comprimento do litoral do Reino Unido e realça as diferenças nos resultados em função da resolução da medida. Nessa mesma sequência lógica, escolheu-se o litoral do golfo do Urabá (Figura 4.1), no limite da Colômbia com Panamá (no mar caribe), a fim de ilustrar a introdução aos fractais.

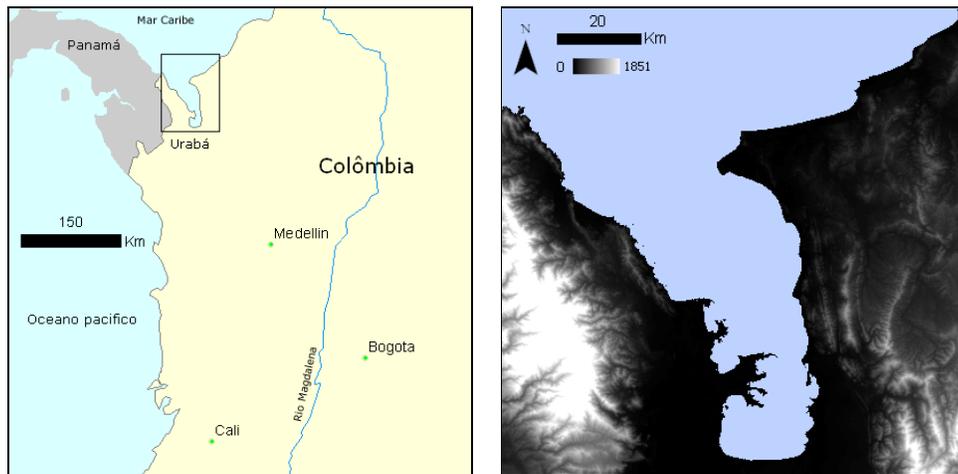


Figura 4.1. Golfo do Urabá

Começamos medindo o litoral com intervalos (ϵ) de 10km (Figura 4.2a) obtendo aproximadamente 29 segmentos ($N(\epsilon)$) que somam um comprimento de 290km. Se medirmos com intervalos de 5km (Figura 4.2b), obter-se-ia aproximadamente 61.5 segmentos e o comprimento medido aumentaria a 307km. Ao medir com intervalos de 1km (Figura 4.2c), o número de segmentos aumentará para 418, equivalentes a um comprimento do litoral de 418km. Assim por diante, o comprimento do litoral aumentará na medida em que a resolução seja mais refinada; até o ponto que, se medir com uma qualidade de detalhe que abranja os grãos de areia, e ainda mais, enxergando numa resolução maior do que um detalhe yoctoscópico, o comprimento do litoral aparentemente não terá limite, tenderá ao infinito.

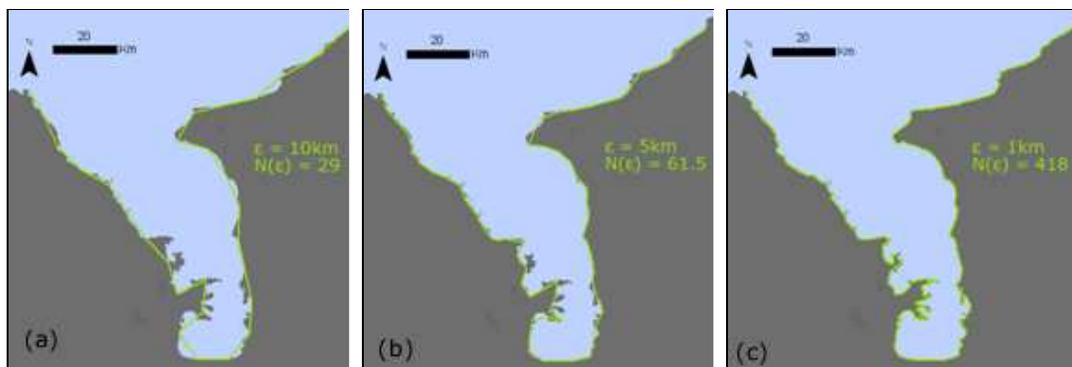


Figura 4.2. Quanto mede o litoral do Urabá?

Então, com relação à pergunta “quanto mede o litoral de Urabá?”, a rigor, a resposta é indeterminada. Isto leva à conclusão de que toda aproximação é dependente da escala, e assim, toda medição deveria especificar a escala. Além disso, o experimento anterior permite efetuar duas observações que serão a porta de entrada nos conceitos da geometria fractal:

- O contorno do litoral possui uma estrutura tortuosa que não encaixa no conceito de “linha reta” nem é o suficientemente intrincado para encher o plano bidimensional;
- Cada pedaço do contorno do litoral se parece ao litoral inteiro, como se o golfo estivesse composto de golfos menores, e cada sub-golfo estivesse composto de golfos ainda menores, e assim por diante;

Os contornos geográficos são tão ricos em detalhe, que usualmente seus comprimentos são infinitos ou até indeterminados. Assim, muitos são estatisticamente auto-similares, ou seja, cada porção pode ser considerada como uma imagem em escala reduzida do todo (Mandelbrot, 1967).

4.1 INTRODUÇÃO À GEOMETRIA FRACTAL

Um fractal é uma entidade geométrica cuja estrutura básica é irregular, fragmentada e se repete em diferentes escalas de observação. O termo e os formalismos matemáticos foram propostos pelo matemático Benoît Mandelbrot em meados do século passado e nasce do latim *fractus*, que significa quebrado ou fraturado (Mandelbrot, 1982). As origens da geometria fractal datam desde finais do século XIX e princípios do século XX com a

aparição (no campo das matemáticas) de conjuntos geométricos com propriedades que não encaixavam dentro da geometria clássica, tais como o triângulo de Sierpinski ou as curvas de Koch (Figura 4.3), entre outros (Mandelbrot, 1982).

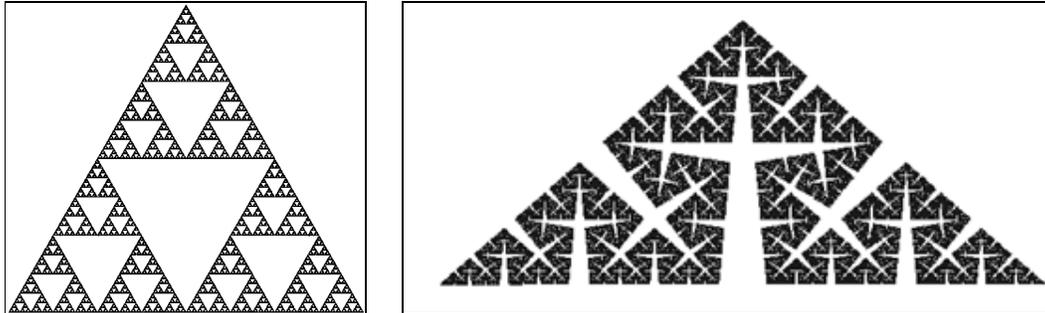


Figura 4.3. Triângulo de Sierpinski (esquerda) e curva de Koch (direita).

Em essência, a construção de padrões fractais implica um processo iterativo onde uma figura semente é transformada repetitivamente de maneira que em cada etapa da transformação é adicionado mais detalhe; esse detalhe consiste na figura semente, porém repetida em vários níveis de observação. Este é o caso da curva de Hilbert (Figura 4.4), a qual consiste numa curva que, num nível infinito de iterações, consegue encher o plano (ou a rigor, qualquer espaço hiperdimensional). Este paradoxo (um objeto unidimensional enchendo o espaço bidimensional) fez com que esta fosse catalogada como um “monstro geométrico” pela ortodoxia científica da época (finais do século XIX e inícios do século XX), que hoje em dia sua conceituação inspirou modelos com aplicação na engenharia, como o caso de redes de drenagem (Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2001)

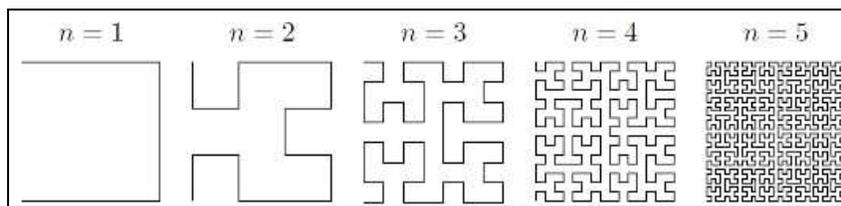


Figura 4.4. Processo iterativo para a construção da curva de Hilbert

Em geral, um objeto fractal tem as seguintes características:

- É muito irregular para ser descrito em termos geométricos tradicionais;
- É auto-similar (as partes se parecem ao todo);

- Possui atributos relacionados em diferentes escalas de observação (o que acontece na micro-escala se parece ao que acontece na macro-escala);

Encontram-se fractais em qualquer canto da natureza e existe muita informação disponível em meios indexados e na internet que elucidam as manifestações fractais da natureza, motivo pelo qual não será dado muito ênfase em exemplificá-las neste trabalho; mesmo assim, para efeitos do foco desta pesquisa, ilustra-se na Figura 4.5 o conceito dos fractais mediante um MDT de uma porção do DF; se a resolução da imagem permitisse maior detalhe, seria possível continuar encontrando padrões auto-similares em cada nível de observação subsequente.

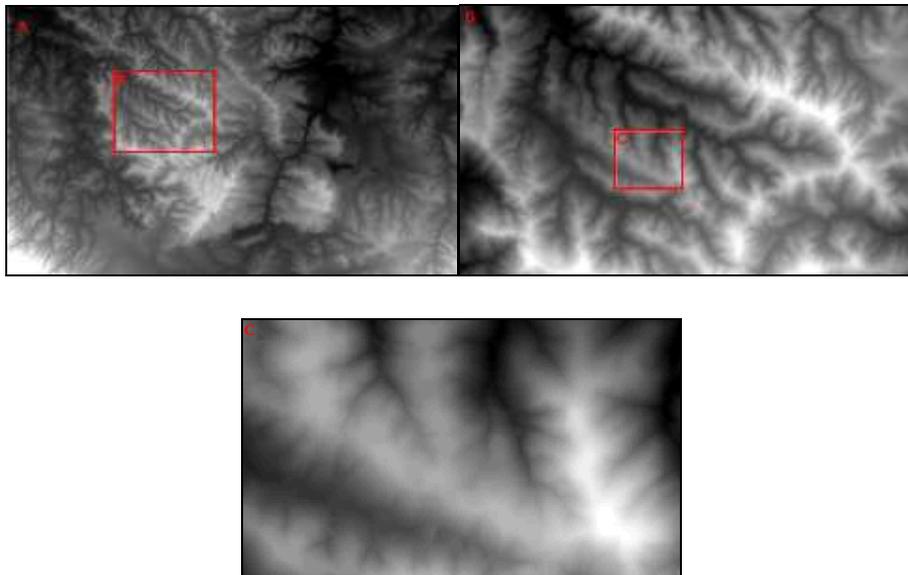


Figura 4.5. Ilustração do conceito de fractal no relevo do DF.

Mesmo que as propostas bases do que hoje conhecemos como fractais têm pouco mais de um século, a concepção básica já foi intuída e manifestada previamente por diversas expressões culturais, artísticas e religiosas do mundo em lugares e épocas separadas, por exemplo, na estrutura hierárquica da arquitetura de algumas tribos africanas (Figura 4.6), nos desenhos do clássico pintor japonês Katsushika Hokusai (Figura 4.7), na cosmogonia muçulmana retratada nos murais dos templos de Alhambra na Espanha (Figura 4.8), na iconografia cristã ilustrada no livro de Kells (Figura 4.9), nos mandalas das milenárias tradições budistas e hinduístas (Figura 4.10) ou nos artesanatos dos indígenas Shipibo no Perú (Figura 4.11).

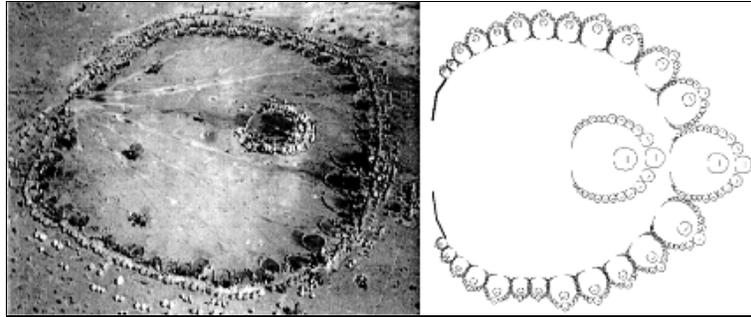


Figura 4.6. Aldeia de Ba-ila (Camarão); Tomado de Eglash (1999)



Figura 4.7. Desenhos de Katsushika Hokusai (1760-1849). [Fonte: http://puntoh.ning.com/profiles/blogs/hokusai-pintaba-fractales](http://puntoh.ning.com/profiles/blogs/hokusai-pintaba-fractales). Consulta: 15/02/2011

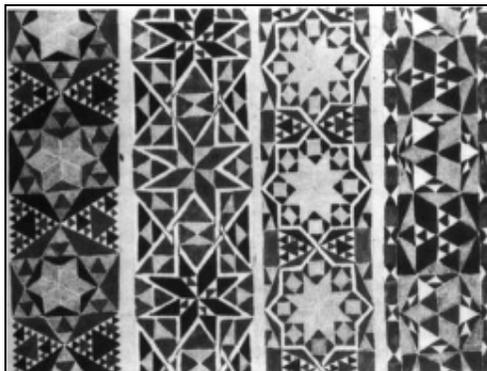


Figura 4.8. Murais de Alhambra (Espanha). Fonte: <http://polynomial.me.uk/2009/09/20/fractals-of-brain-fractals-of-mind>. Consulta: 15/02/2011



Figura 4.9. Iconografia cristã. Fonte: <http://polynomial.me.uk/2009/09/20/fractals-of-brain-fractals-of-mind>. Consulta: 15/02/2011



Figura 4.10. Mandalas: Símbolos hinduístas e budistas que representam o universo. Fonte: <http://www.taringa.net/posts/imagenes/5487879/Mandala-definicion-e-imagenes.html>. Consulta:

15/02/2011

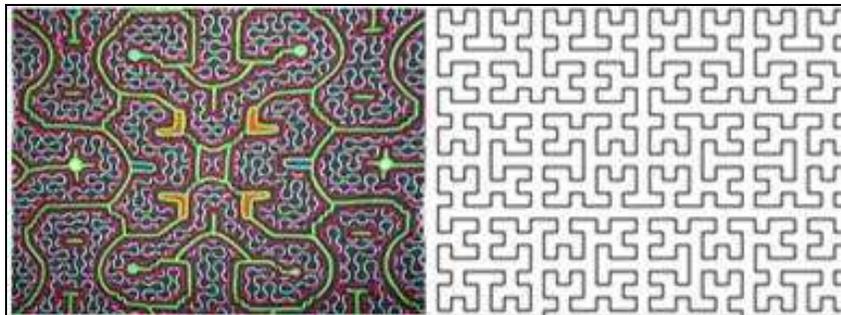


Figura 4.11. Artesanato dos indígenas Shipibo (Perú) comparados com a curva e Hilbert. Fonte: <http://dataisnature.com/?p=596>, Consulta: 13/05/2011

4.2 A DIMENSÃO FRACTAL

Euclides (325-265 AC) definiu as dimensões topológicas zero, um, dois e três para descrever o espaço contido num ponto, linha, plano e volume, respectivamente. Não conforme com o paradigma euclidiano, Mandelbrot estabeleceu o conceito da dimensão fractal, o qual é um número não necessariamente inteiro que quantifica a percepção subjetiva da densidade com que um fractal ocupa o seu espaço topológico subjacente. Assim, as dimensões das entidades fractais podem ser números fracionados menores do que a dimensão euclidiana que contém o fractal.

Uma abordagem fractal da textura do relevo pode consistir na descrição da sua rugosidade em termos da dimensão fractal (Figura 4.12), onde dimensões fractais perto de dois representam terrenos com tendência plana, cuja rugosidade aumenta conforme a dimensão fractal se aproxima a três. Muitas superfícies resultantes do tecido da roupa, erosão, aglomeração de partículas ou fraturas costumam possuir estas características.

Também se tem mostrado que as imagens dessas superfícies, quando produzidas mediante a reflexão de luz difusa ou digitalização de microscópio eletrônico são fractais (Russ, 2007).

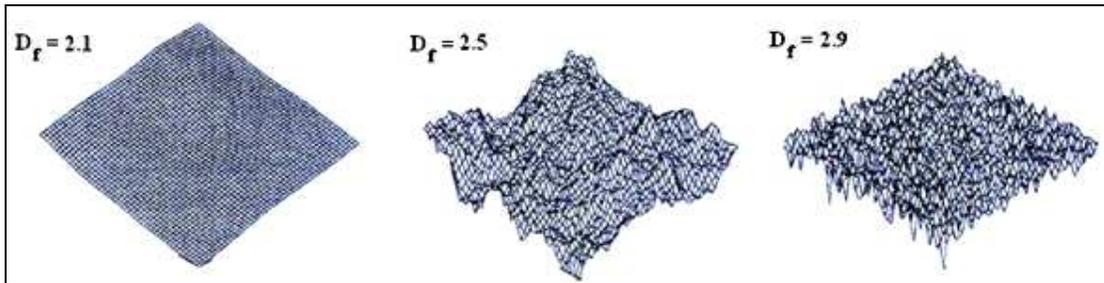


Figura 4.12. Dimensão fractal de superfícies rugosas. Tomadas de Russ (1993)

Os padrões de drenagem também podem ser interpretados como entidades fractais com dimensão fracionada entre um e dois; quando se trata de sistemas de lagoas, é possível até conceber dimensões fractais entre zero e um. Quanto mais perto de dois é a D_f , mais sinuoso o canal em questão ou mais denso será o sistema de drenagem (Figura 4.13).

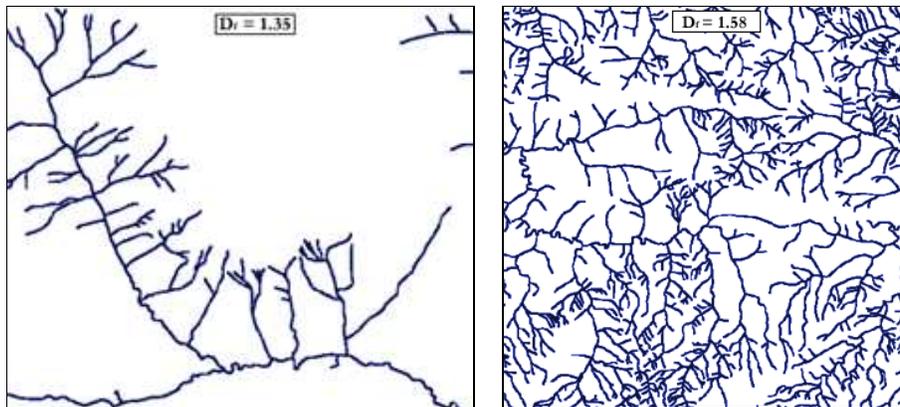


Figura 4.13. Padrões de drenagem cujas D_f são 1.35 e 1.58 respectivamente.

4.3 PROCESSOS FRACTAIS E O MOVIMENTO BROWNIANO

Além das evidências visuais da fractalidade dos padrões geométricos naturais, existe comportamento fractal na dinâmica de diversos fenômenos, por exemplo, na turbulência, na flutuação da bolsa de valores, nas batidas do coração, na frequência sísmica, entre outros (Mandelbrot & Van Ness, 1968). Partindo das observações do biólogo e botânico Robert Brown em 1827 sobre o movimento errático das partículas suspensas no ar (agora chamado de movimento Browniano e também conhecido como “caminhada aleatória” ou “trajetória do bêbado”; Figura 4.14), Mandelbrot & Van Ness (1968) propuseram vários

tipos de processos fractais que são de interesse na modelagem topográfica (Russ, 1993). Alguns desses conceitos serão utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho.

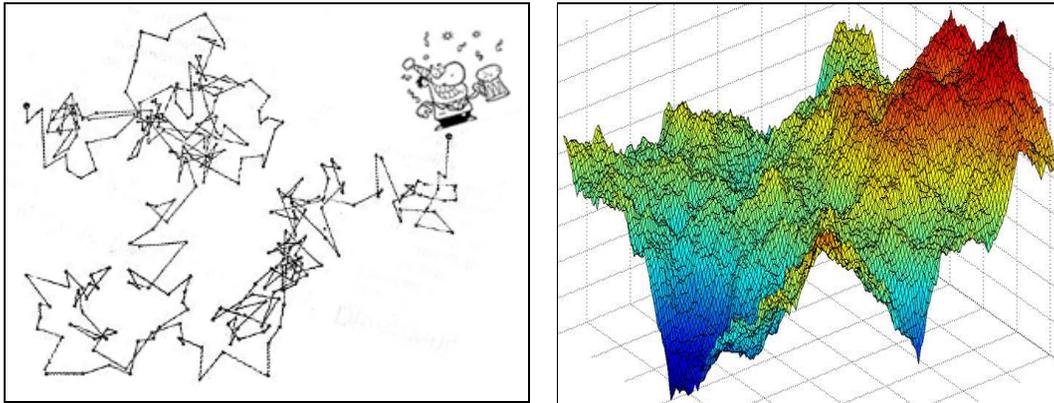


Figura 4.14. Movimento Browniano (esquerda); Modelo topográfico baseado no movimento Browniano (Direita)

4.4 ANÁLISE FRACTAL

A importância da dimensão fractal radica em que ela pode ser definida em relação com dados do mundo real e pode ser aproximada mediante experimentos (Mandelbrot, 1967), métodos numéricos (Mandelbrot, 1982; Xie *et al*, 1998, Schuller *et al*, 2001; De Melo, 2007), métodos estatísticos (Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2007; Russ, 1993, 2007), métodos analíticos (Mandelbrot, 1982) ou técnicas de processamento de imagem (Veltri *et al*, 1996; Maître & Pinciroli, 1999; De Melo, 2007). Existem várias maneiras para calcular a D_b , a seguir, serão descritas diversas metodologias de análise fractal.

4.4.1 DIMENSÃO DE HAUSDORFF

No ano de 1919, Felix Hausdorff propôs um método analítico que sugere a estimação mais “pura” da dimensão fractal e, a rigor, deveria ser usado para todos os casos, porém apresenta dificuldades para ser estimado mediante métodos computacionais (De Melo, 2007), ficando limitado para casos idealizados. A dimensão de Hausdorff (D_H) é definida pela Equação 4.1, onde N representa a quantidade de unidades que formam o objeto, l_b é o comprimento do objeto (projeção unidimensional) e h é o comprimento das unidades que formam o objeto. Exemplos de cálculo são ilustrados na Figura 4.15:

$$D_H = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\text{Log}N}{\text{Log}(l_b / h)} \quad (4.1)$$

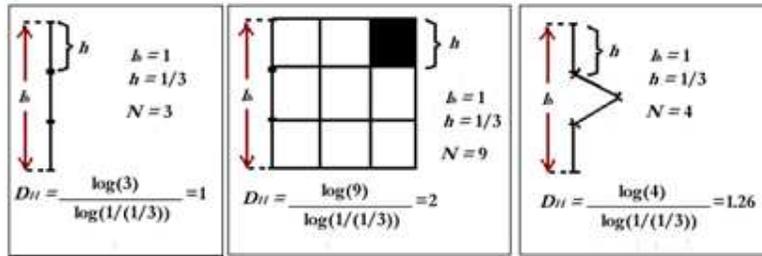


Figura 4.15. Dimensão de Hausdorff calculada para uma linha reta, um quadrilátero e uma linha fraturada.

4.4.2 MÉTODO DA CONTAGEM DE CÉLULAS (*BOX-COUNTING*)

É a técnica mais citada na literatura científica e representa a base de estimação numérica da D_f . O valor estimado é chamado de “dimensão de capacidade”, “entropia de Kolmogorov” ou “dimensão de Kolmogorov” (Russ, 1993); o método consiste em superpor o objeto fractal com uma grade igualmente espaçada (tamanho de célula ϵ) e logo contar as células necessárias para cobrir o fractal ($N(\epsilon)$). O processo é iterado usando uma grade cada vez mais refinada e a D_f é calculada revisando a relação exponencial entre a resolução da medida (ϵ) e o tamanho do detalhe obtido para cada nível de resolução $N(\epsilon)$ (Equação 4.2).

$$D_f = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\text{Log}N(\epsilon)}{\text{Log}(1/\epsilon)} \quad (4.2)$$

Se a nuvem de pontos do gráfico $\log(1/\epsilon)$ versus $\log(N(\epsilon))$ se ajusta numa linha reta, significa que há uma conservação das propriedades topológicas em diferentes escalas, demonstrando que as partes se parecem ao todo em diferentes resoluções de observação, por tanto o objeto geométrico é um fractal; no caso contrário, o objeto poderia não ser fractal ou até mesmo ser multifractal. Ilustra-se a metodologia na Figura 4.16, o conceito pode ser extrapolado para o caso tridimensional (Figura 4.17) ou n-dimensional.

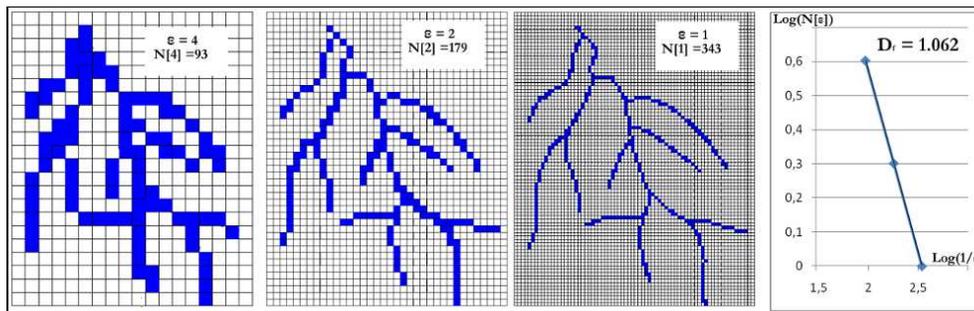


Figura 4.16. Exemplo do método da contagem de células para um rio genérico

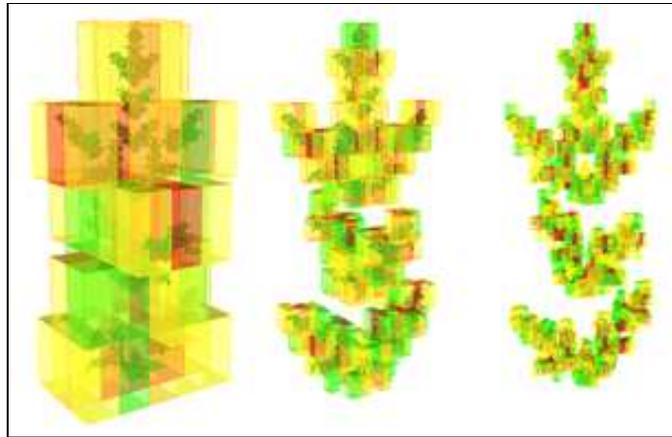


Figura 4.17. Contagem de células de uma planta em 3D. Fonte:

<http://openalea.gforge.inria.fr/wiki/doku.php?id=documentation:demo:fractal>. Consulta:

06/06/2011

O número mínimo de células sugeridas para a contagem de células é dezesseis (Bérubé & Jébrak, 1999) e alguns problemas já foram reportados (Roach & Fowler, 1993; Baumann *et al*, 1994; citados por Bérubé & Jébrak, 1999) como por exemplo, subestimação da D_f . A colocação arbitrária da grade sobre a imagem pode resultar em erros, os quais podem ser reduzidos com o valor médio de múltiplas grades localizadas em diferentes pontos de partida e mediante estimações com a imagem rotacionada em diversos ângulos.

4.4.3 ANÁLISE DE HURST

Esta proposta foi iniciada pelo hidrólogo Harold Hurst durante seus estudos sobre a capacidade de reservatórios (principalmente no rio Nilo) na primeira metade do século passado. Mandelbrot & Van Ness (1968) identificaram os fenômenos estudados por Hurst como processos fractais e adaptaram a metodologia inicial de Hurst em termos da geometria fractal.

O método é uma extensão do movimento Browniano e também é chamado de “Análise de faixa escalonada” (*rescaled range analysis*) ou “Análise R/S” e tem aplicação em diversas áreas como as finanças, hidrologia, geografia, entre outras.

A análise de Hurst propõe que dado um processo aleatório $F(t)$, a variância será denotada pela Equação 4.3, onde H é o coeficiente de Hurst e varia entre 0 e 1 (Mandelbrot & Van Ness, 1968; Zhu, 1996; zahouani et al, 1998; Franceschetti & Riccio, 2007).

$$\text{Var}(F(t_2) - F(t_1)) \propto |t_2 - t_1|^{2H} \quad (4.3)$$

Para uma superfície, a variável t é substituída pelos pontos coordenados x e y no plano, resultando $F(x,y)$ como a superfície de altitude z na posição x,y . Tal superfície é chamada de superfície fracionária Browniana, cujo valor esperado ($E[\]$) é descrito pela Equação 4.4:

$$E\left[\left(F(x,y) - F(x+\Delta x, y+\Delta y)\right)^2\right] = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{2H} \quad (4.4)$$

A relação entre D_f e H é dada pela Equações 4.5 e 4.6. Assim, quanto menor é H , mais rugosa será a superfície (Figura 4.18), ou seja, H é um coeficiente de rugosidade.

$$\text{Superfícies} : D_f = 3 - H \quad (4.5)$$

$$\text{Perfis ou Séries de tempo} : D_f = 2 - H \quad (4.6)$$

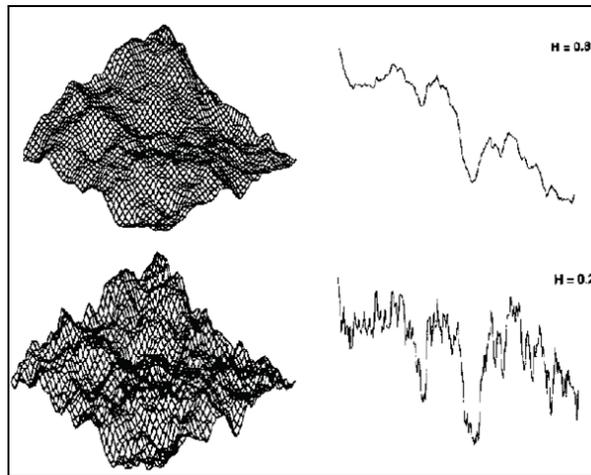


Figura 4.18. Simulação de superfícies fracionárias Brownianas (Sahimi, 2000)

4.4.4 MÉTODO DA COBERTURA PROJETIVA

As superfícies fractais possuem uma área matematicamente indefinida, esta é maior do que a área projetada horizontalmente pela superfície irregular, e incrementa na medida em que a escala de medida varia mais refinada. A D_f pode ser determinada revisando a relação logarítmica da área medida *versus* o tamanho da medida.

O método da cobertura projetiva (Xie *et al*, 1998; Xie & Wang, 1999), opera nessa ordem de idéias; dada uma superfície fractal e sua respectiva projeção horizontal (Figura 4.19), para a k -ésima janela $abcd$ de comprimento ϵ com alturas conhecidas (h_{ak} , h_{bk} , h_{ck} e

h_{dk}), a área pode ser estimada mediante as Equações 4.5 e 4.6 e a D_f segundo a Equação 4.7, onde A_0 é a área aparente (projeção horizontal) da superfície

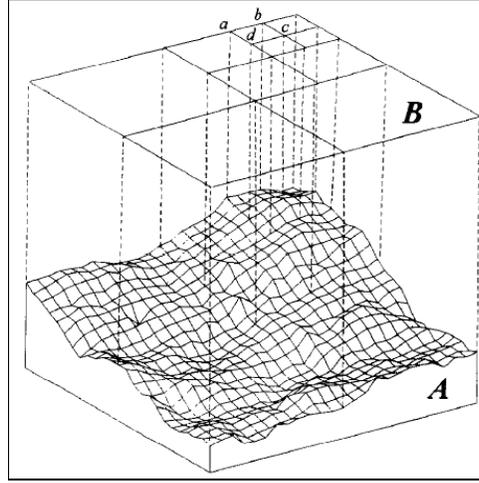


Figura 4.19. Método da cobertura projetiva

$$A_k(\varepsilon) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\varepsilon^2 + (h_{ak} - h_{dk})^2 \right]^{1/2} \times \left[\varepsilon^2 + (h_{dk} - h_{ck})^2 \right]^{1/2} \times \left[\varepsilon^2 + (h_{ak} - h_{bk})^2 \right]^{1/2} \times \left[\varepsilon^2 + (h_{bk} - h_{ck})^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (4.5)$$

$$A_T(\varepsilon) = \sum_{k=1}^{N(\varepsilon)} A_k(\varepsilon) \quad (4.6)$$

$$D_f = 2 - \frac{\log[A_T(\varepsilon)/A_0]}{\log[\varepsilon]} \quad (4.7)$$

4.4.5 ESTIMAÇÕES DIFERENCIAIS

Os métodos recentemente citados permitem estimar a D_f de maneira global para uma entidade fractal, porém é comum encontrar variações da D_f ao longo do espaço de interesse; nesses casos é atraente fazer estimações locais e não uma estimacão global. Isto é feito de acordo com os conceitos apresentados no item 3.2 (Algoritmos geomorfométricos), de maneira que uma janela móvel é programada para varrer o fractal (por exemplo, contagem de células diferencial), estimando a D_f em cada passo.

4.5 MULTIFRACTAIS

De maneira geral, um multifractal é um conjunto formado por uma hierarquia de subconjuntos, cada um deles de caráter fractal. Diferente do que acontece nas estruturas

fractais (nas quais só uma D_f descreve todo o sistema), nos multifractais são requeridos várias estruturas acopladas para ter noção das mudanças hierárquicas nas escalas de tempo ou de espaço.

Um conjunto multifractal pode ser considerado como a união de vários conjuntos “monofractais” livremente interligados entre si. Essa união pode ser descrita por um número infinito de dimensões generalizadas D_q , (também chamadas de “Dimensões de Renyi”) e também mediante o espectro de singularidade $f(\alpha)$ (também conhecido como “espectro multifractal”). D_q em função do momento de probabilidade de ordem q é dado pela Equação 4.8 (com exceção de $q=1$, em cujo caso se utiliza a Equação 4.9), este é estimado mediante um processo análogo ao algoritmo da contagem de células, sendo o objeto geométrico de estudo particionado uniformemente, onde ε é o tamanho da célula de partição e p_i é a probabilidade de um pixel pertencer ao fractal na partição da célula i :

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\ln \left[\sum_i p_i^q \right]}{\ln [\varepsilon]} \right); \quad q \in \mathbb{R} \neq 1 \quad (4.8)$$

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\sum_i p_i \ln [p_i]}{\ln [\varepsilon]} \right) \quad (4.9)$$

O espectro multifractal é determinado pelas Equações. 4.10 a 4.12; ao fazer o gráfico de α_q versus $f(\alpha_q)$ determina-se se o objeto de estudo é multifractal quando a gráfica tem forma parabólica, caso contrário, o objeto seria “monofractal” ou não-fractal

$$f(\alpha_q) = q\alpha_q - \tau_q \quad (4.10)$$

$$\tau_q = (q-1)D_q \quad (4.11)$$

$$\alpha_q = -\frac{d\tau_q}{dq} \quad (4.12)$$

Existem vastas propostas para executar análise multifractal (Xie *et al*, 1998; Posadas *et al*, 2001, 2002; Montero-Pascual, 2003; Gaudio *et al*, 2006; Dombrádi *et al*, 2007).

4.6 LACUNARIDADE

Proposta por Mandelbrot (1982) para descrever as características de fractais com a mesma dimensão fractal e diferentes aparências de textura (Figura 4.20), tem a ver com a distribuição e tamanho dos vazios (lacunas). De maneira geral, se um fractal tem grandes vazios ou buracos, tem lacunaridade (λ) alta, fractais densos possuem lacunaridade baixa.

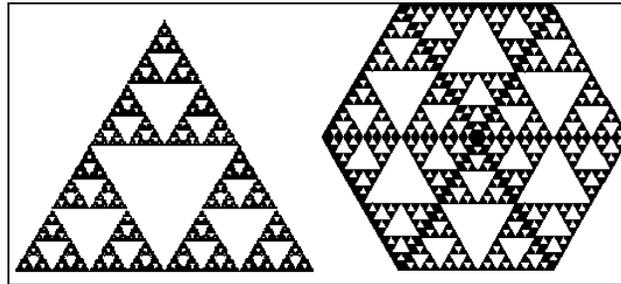


Figura 4.20. Dois objetos com a mesma dimensão fractal e diferente lacunaridade.

Este índice pode ser útil para determinar a “porosidade” das paisagens (heterogeneidade ou descontinuidade da estrutura), sendo um complemento indicado na análise fractal. O método computacional mais aceito na literatura sobre este parâmetro é o algoritmo da célula deslizante (*gliding-box*) (Allain & Cloitre, 1991), o qual opera sob os mesmos princípios dos algoritmos geomorfométricos (item 3.2), onde uma janela móvel varre o fractal estimando λ em cada passo de acordo com a Equação 4.13, onde σ é o desvio padrão e μ é a média aritmética dos valores das células do fractal dentro da janela móvel.

$$\lambda = (\sigma/\mu)^2 \quad (4.13)$$

Este parâmetro tem sido usado em várias aplicações de segmentação de imagens, por exemplo, para mapear a densidade de drenagem (Shahzad *et al*, 2010) ou na classificação de texturas em imagens de satélite (Barros-Filho & Sobreira, 2008; Alves-Junior & Barros-Filho, 2005)

4.7 COMENTÁRIOS SOBRE OS FRACTAIS

Após ter revisado algumas considerações básicas sobre a geometria fractal, são feitas várias observações para fechar o capítulo:

- As técnicas de análise fractal não se limitam às aqui apresentadas, existem outros métodos de estimação da dimensão fractal disponíveis na literatura, não foram

explorados neste trabalho, tais como o método do variograma (Wen & Sinding-Larsen, 1997, Sung & Chen, 2004; Zhou & Lam, 2005, Vidal-Vasquez *et al*, 2005), o espectro de potências (Wen & Sinding-Larsen, 1997), o prisma triangular (Zhou & Lam, 2005; Ju & Lam, 2009), ou a análise da média das raízes quadradas (Vidal-Vasquez *et al*, 2005);

- As superfícies fractais e os padrões de drenagem não necessariamente são fractais puros com D_f constante, ao invés disso, a D_f pode variar em certos domínios de escalas (multifractais), sendo necessário identificar esses domínios;
- Conforme ao marco exposto, a D_f será associada ao relevo para descrever dois atributos: (i) Rugosidade e (ii) Densidade de drenagem;
- A análise fractal destes dois atributos em cada ponto do espaço (conforme aos conceitos do item 4.4.5) permitirá desenvolver o escopo final do trabalho de segmentar o terreno em termos das propriedades litológicas que são refletidas pelos atributos do relevo.

5. A TEXTURA DO RELEVO

O termo “relevo” se refere à diferença de altura entre dois pontos; isto é numa superfície de interesse (não só terrenos, mais também outras superfícies como a pele, os pavimentos ou o tecido da roupa) em cujo domínio percebe-se uma disposição geométrica descritível em termos da percepção da textura; entendendo por “textura” o padrão de arranjo das menores feições que conservam a identidade na escala de representação.

Assim, em escalas de trabalho sub-regionais e regionais, apresentam-se, por exemplo, superfícies rugosas (ou montanhosas) (Figura 5.1), superfícies onduladas (Figura 5.2), e superfícies planas (Figura 5.3). Todas estas categorias são alegóricas à percepção da textura do relevo em questão.



Figura 5.1. Superfície rugosa: Chapada dos veadeiros (Go, Brasil). Imagem do autor



Figura 5.2. Superfície ondulada: DF (Brasil). Fonte: Souza, 1998b.



Figura 5.3. Superfície plana: BR-010 (Go, Brasil). Imagem do autor.

Sobra dizer que classificar o relevo em termos de textura é uma questão relativa à escala de observação. Assim, por exemplo, observadas desde ionosfera, a Chapada dos Veadeiros (Figura 5.1) pareceria plana; no entanto uma superfície “plana” sobre a qual costumamos caminhar diariamente (Figura 5.4), do o ponto de vista de uma formiga poderia ser concebida como montanhosa.



Figura 5.4. ¿Superfície plana ou rugosa? Depende da escala de observação. Imagem do autor

Para efeitos da gestão do território, sempre houve interesse científico na natureza geométrica do relevo, assim surgiu a morfometria de relevos (ou geomorfometria), definida como o ramo da ciência focado na análise quantitativa da superfície do terreno (Hengl & Reuter, 2009) e fundamenta-se nas geociências, as matemáticas e o geoprocessamento. Durante este capítulo, contextualizar-se-á a abordagem clássica e será introduzida uma perspectiva fractal; esclarece-se que além da abordagem fractal, existem outras novas tendências que não serão abordadas neste trabalho (Romão & Souza, 2007; Huaxing, 2008; Shary, 2008; Hengl & Reuter, 2009; Grohmann *et al*, 2011), como por exemplo, a análise de Fourier, geoestatística, análise de wavelet ou os métodos de entropia.

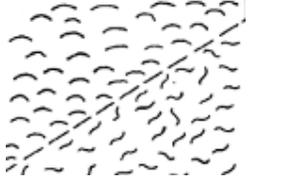
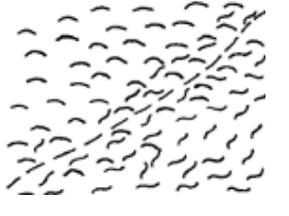
5.1 ABORDAGEM CLÁSSICA DA MORFOMETRIA DO RELEVO

A morfometria do relevo considera a superfície terrestre como uma unidade heterogênea e contínua, porém segmentável qualitativa e quantitativamente; assim, de

acordo com Evans (2010), abrange questionamentos como “O que é (ou onde é) uma montanha?” os quais implicam considerações perceptuais e linguísticas para atingir o escopo de extrair medidas e identificar entidades espaciais de dados disponíveis na topografia digital. Segundo Soares & Fiori (1978), a menor superfície contínua e homogênea distinguível numa imagem (ou em qualquer representação cartográfica) é denominada “elemento de textura” ou “elemento textural” e é possível separar graus de densidade de textura, ou seja, agrupar zonas com determinado número de elementos texturais por unidade de área.

As zonas da imagem com propriedades texturais diferentes são separadas por limites. Todas estas propriedades dependem da escala de observação e seus valores são relativos dentro do mesmo nível de investigação, variando com o grau de resolução da análise e a qualidade das imagens ou mapas. Soares & Fiori (1978) sugerem três categorias para classificar o tipo de limite (Tabela 5.1):

Tabela 5.1. Limites texturais

Limite	Descrição	Ilustração
Definido	Coincide com uma forma linearmente estruturada	
Progressivo	As propriedades de uma zona homóloga são substituídas progressivamente pelas propriedades de outra	
Envoltório	Um conjunto cobre outro, ambos com propriedades texturais/estruturais diferentes	
 = Elementos texturais de relevo		

Nessa ordem de idéias, a segmentação das unidades do relevo é definida pelo nível de concordância (ou grau de homogeneidade) entre os elementos texturais. A Figura 5.5 ilustra o raciocínio mediante perfis esquemáticos.

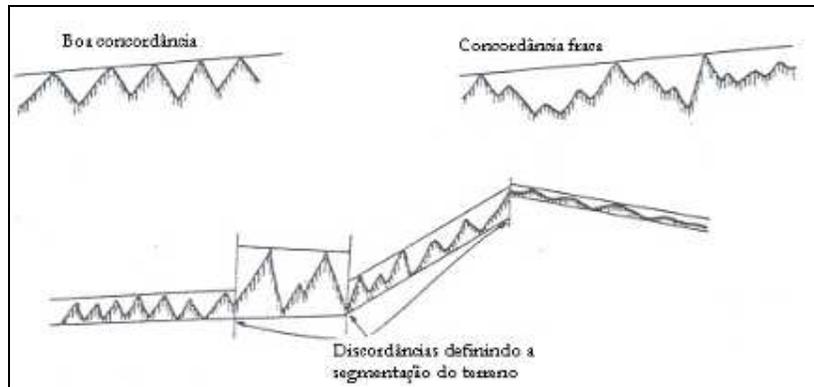


Figura 5.5 Segmentação do relevo a partir da discordância entre os elementos texturais. Modificado de Speight (1976)

No caso anterior, a definição dos limites implica um raciocínio booleano (quer dizer, classificação do tipo “pertence ou não pertence”), o qual foi o sistema de pensamento adotado para estabelecer categorias no marco desta pesquisa; mesmo assim, sabe-se que existem classificações baseadas na lógica difusa, onde as transições são graduais (ou difusas) e os elementos vizinhos não são mutuamente excludentes entre si (um elemento textural pode pertencer a varias categorias de textura). Para satisfação do leitor curioso, a segmentação dos elementos do relevo baseada na lógica difusa pode ser estudada nos trabalhos de Irvin *et al* (1997), Schmidt & Hewitt (2004) ou Minár & Evans (2008).

5.2 RELAÇÕES ENTRE OS PADRÕES DO RELEVO E O SUBSTRATO SUBJACENTE

A configuração geométrica dos padrões texturais da superfície terrestre é o resultado de múltiplos fatores, principalmente da ação conjunta entre a história tectônica, a história climática e o tipo de substrato litológico/pedológico subjacente, em escalas sub-regionais (por exemplo, 1:10.000) considera-se que toda a área de estudo possui as mesmas condições climáticas e a mesma história tectônica. Assumindo escalas de tempo antrópicas (onde a percepção das macro-mudanças do relevo é nula para a humanidade), intui-se que a compreensão dos padrões geométricos da textura do relevo pode ser usada para prever os atributos do substrato litológico/pedológico que mais influem nos seus usos potenciais;

aliás, este intuito já foi percebido e abordado por várias pesquisas durante o século passado, com destaque dos trabalhos de Guy (1966), Speight (1976) e Soares & Fiori (1978), onde foram estabelecidas algumas relações citadas a seguir:

- As rochas relativamente mais resistentes ao intemperismo tendem a apresentar maior densidade de relevo (ou rugosidade), por manterem maior irregularidade na superfície. Onde a cobertura subsuperficial ou os solos são mais espessos, a densidade de textura do relevo é menor;
- Para uma área com o mesmo índice pluviométrico, densidades maiores significam menor potencial de infiltração e vice-versa;
- Zonas homólogas com maior densidade de traços de fratura refletem rochas com menor grau de plasticidade, entendendo por plasticidade a capacidade de um material ser deformado sem ruptura;

5.3 PARÂMETROS BÁSICOS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Os elementos fundamentais na análise do relevo para interpretação geológica são as rupturas de declive, as quais definem os elementos texturais do relevo, caracterizadas pelas menores variações bruscas identificáveis na imagem da superfície do terreno. As diferentes propriedades da textura e estrutura do relevo, examinadas de forma combinada, permitem definir e caracterizar diferentes zonas homólogas, refletindo distintas propriedades das rochas. Segundo Soares & Fiori (1978), as principais propriedades dos elementos texturais do relevo deriváveis da fotointerpretação são:

- Densidade de textura de relevo: avaliação da quantidade de microfeições de relevo por unidade de área;
- Quebra: Constitui pontos de inflexão, definindo limites entre zonas homólogas do relevo. Pode ser positiva (ou saliente, como cristas) ou negativa (formas rebaixadas);
- Assimetria: Considera-se relevo assimétrico quando as quebras negativas e positivas separam zonas de declividade maior e menor, ou com propriedades de relevo diferentes;

- Alinhamento: Constitui a orientação dos conjuntos de elementos texturais; geralmente a ausência de paralelismo indica mudanças nas unidades homogêneas;
- Curvatura: A definição da concavidade ou convexidade do relevo baseia-se nos conceitos da geometria diferencial formulada por Gauss em 1827 (Shary *et al*, 2005), a referência bibliográfica mais antiga sobre classificações de curvatura data de meados do século XIX (Figura 5.6) e ao longo do tempo já foram propostos vários sistemas de classificação da curvatura (Figura 5.7)

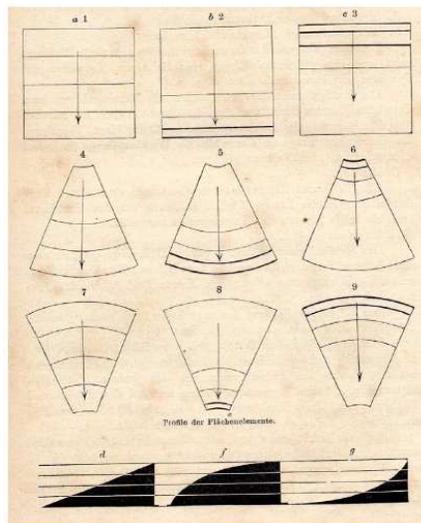


Figura 5.6. Ilustração dos nove tipos básicos de curvatura, segundo o serviço de geografia militar Austríaco em 1862 (Hengl & Reuter, 2009)

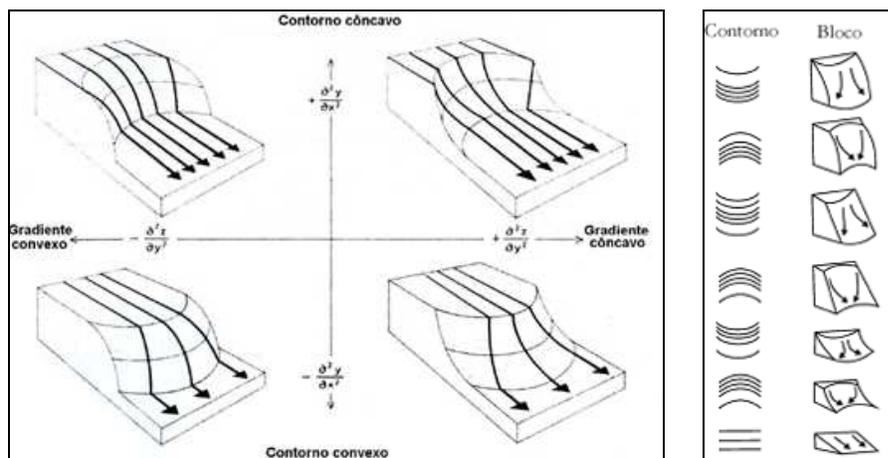


Figura 5.7. Curvatura do terreno segundo Huggett (1975) (esquerda) e Penock *et al* (1987) (direita). modificado de Hengl & Reuter (2009)

Além das propriedades já citadas anteriormente (surgidas na era da fotointerpretação), a evolução das tecnologias em geoprocessamento viabilizou a existência de muitos parâmetros quantitativos deriváveis das geoformas (Shary *et al*, 2005; Hengl & Reuter, 2009; Grohmann *et al*, 2011), todos eles calculáveis mediante técnicas e conceitos do geoprocessamento apresentados no capítulo 3.

Há uma serie de parâmetros quantitativos que são perenes à maioria das fontes bibliográficas consultadas (Tabela 5.2), alguns do tipo local e outros do tipo regional (tipicamente computadas mediante processos de varredura), todos eles fundamentados em equações matemáticas que não consideram os processos genéticos da superfície terrestre.

Tabela 5.2. Parâmetros básicos da superfície terrestre (Shary et al, 2005; Hengl & Reuter, 2009)

Alguns parâmetros básicos da superfície terrestre		
Parâmetro	Tipo	O que descreve?
Cota	Local	Energia potencial gravitacional da superfície
Declividade	Local	Varição altimétrica
Aspecto	Local	Direção de fluxo
Curvatura tangencial	Local	Primeiro mecanismo de acumulação
Curvatura do perfil	Local	Segundo mecanismo de acumulação
Área de captação	Regional	Magnitude de fluxo
Hipsometria	Regional	Distribuição dos valores da altura
Insolação	Regional/Local	Intensidade da radiação solar direta
Exposição visual	Regional	Extensão da área visível
Rugosidade	Local	Complexidade geométrica do terreno

Este último parâmetro (rugosidade) é de especial interesse neste trabalho; a seguir serão comentados aspectos sobre diversas maneiras de abordagem do parâmetro da rugosidade.

5.4 ÍNDICES DE RUGOSIDADE

Quantificar a rugosidade das superfícies permite identificar formas do relevo e visualizar a variabilidade de uma superfície topográfica numa dada escala. A seguir, será apresentada uma breve descrição de índices de rugosidade encontrados na literatura; esclarece-se que não são os únicos existentes (porém, os mais simples) e os avanços na geomorfometria continuam publicando propostas para encarar esta característica das superfícies topográficas.

5.4.1 RELAÇÃO DE ÁREAS

Avalia as semelhanças entre a área da superfície real e a área plana para células quadradas ou triangulares definidas numa região dada, estimando a relação entre esses valores. Superfícies planas apresentam valores perto de um, no entanto, nas superfícies irregulares apresentam um comportamento curvilíneo assintótico com tendência ao infinito à medida em que a área real aumenta. Grohmann *et al* (2011) não aconselham este parâmetro devido a resultados incongruentes entre o índice e as condições do terreno estudado.

5.4.2 DESVIO PADRÃO DA DECLIVIDADE

A declividade é a primeira derivada da elevação da superfície, ou seja, mede a taxa de mudança de elevação tendo um plano horizontal como referência. A estimação local do desvio padrão da declividade (de acordo com as noções do item 3.2) permite estabelecer relações com a rugosidade do terreno, de maneira que terrenos planos estão representados por baixa variação da declividade. Grohmann *et al* (2011) sugerem este como índice simples e satisfatório para quantificar a rugosidade, demonstrando sensibilidade às mudanças abruptas no relevo.

5.4.3 DESVIO PADRÃO DA CURVATURA DO PERFIL

A curvatura é a segunda derivada da elevação da superfície e é composta de três elementos: perfil, plano e curvatura tangencial. De particular interesse é a curvatura do perfil (taxa de mudança da declividade), devido que ajuda identificar mudanças na rugosidade e pode ser estimada segundo Hengl & Reuter (2009). Desta maneira, o uso de janelas móveis (ver item 3.2) permite estimar o desvio padrão da curvatura do perfil de maneira local, onde desvios padrões altos representam altas rugosidades e vice-versa.

5.4.4 DESVIO PADRÃO DA ALTURA

Hengl & Reuter (2009) sugerem este parâmetro como o mais simples de estimar, consiste na estimação local do desvio padrão dos valores da altura mediante um processo de varredura com janela móvel.

5.4.5 ABORDAGEM FRACTAL DA TEXTURA

Uma propriedade interessante da topografia e sua possível auto-similaridade (estrutura fractal), o qual é certo para um domínio limitado de escalas (Goodchild & Mark, 1987; Xie et al, 1998), onde $2 \leq D_f < 3$. A dimensão fractal é um claro indicador da complexidade do terreno e o conceito pode ser aplicado a uma superfície como um todo (Xie et al, 1998; Russ, 2007), porém uma análise fractal local permitirá obter um novo plano de informação contendo valores da D_f espacializada, ao invés de um único valor (Sung & Cheng, 2004; Taud & Parrot, 2005; Vidal-Vásquez et al, 2005). Sung & Cheng (2004) e Taud & Parrot (2005) concluíram que dimensão fractal permite descrever a rugosidade localmente, encontrando coincidências entre o a variação do parametro e feições morfotectônicas. Outra maneira de análise fractal de superfícies é mediante a análise da forma dos contornos topográficos (curvas de nível); neste caso $1 < D_f < 2$.

Seja a partir de valores altimétricos ou de contornos topográficos, a análise fractal da textura do relevo deverá passar por um processo de escolha do método de estimação da dimensão fractal, segundo as técnicas apresentadas no item 4.4, e determinar o domínio de escalas válidas da auto-similaridade

5.4.6 SIMULAÇÃO DE TERRENOS FRACTAIS

A simulação de terrenos com base em modelos fractais é considerada como um dos métodos mais promissórios para modelar a complexidade do terreno (Li et al, 2005), isto é de interesse na computação gráfica (animação e videogames) e na cartografia (modelagem topográfica); neste último caso, se os dados topográficos são vagos ou não estão disponíveis, a topografia pode ser simulada.

As superfícies fracionárias Brownianas (item 4.4.3) viraram a figura mais estudada para representar terrenos fractais (Mandelbrot & Van Ness, 1968; Zhu, 1996; zahouani et al, 1998; Franceschetti & Riccio, 2007) e existem diversos métodos para efetuar as simulações, inclusive técnicas importadas da análise de sinais, como a densidade espectral, a transformada de Fourier, as adições aleatórias sucessivas, a função de Weierstrass ou a

decomposição de Wavelet estão disponíveis na literatura (Voss, 1985; Zahouani et al, 1998; Sahimi, 2000; Franceschetti & Riccio, 2007).

Este trabalho aprofundará no método DPM (Deslocamento do Ponto Médio ou *midpoint displacement*; Fournier *et al*, 1982), o qual é um simples algoritmo de subdivisão recursiva que em essência, consiste no processo iterativo ilustrado nas Figuras 5.8 e 5.9

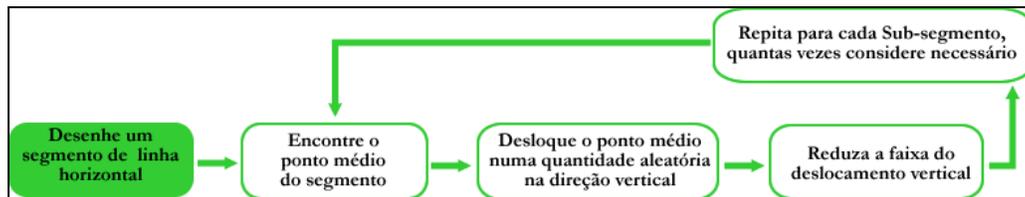


Figura 5.8. Diagrama de fluxo do algoritmo DPM

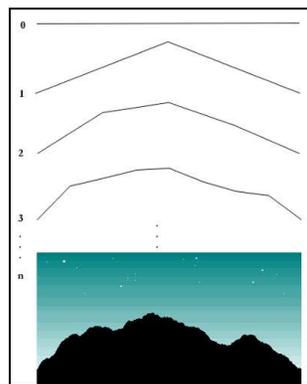


Figura 5.9. Exemplo de paisagem criada mediante o algoritmo DPM numa dimensão. Fonte: <http://gameprogrammer.com/fractal.html#midpoint>. Consulta: 29/08/2011

Os focos de discussão científica e de diversas alterações no algoritmo original têm sido com relação ao ponto de quebra ou deslocamento (que a rigor, não precisa ser na metade do segmento) e à quantidade aleatória do deslocamento vertical, para este último há relações entre o coeficiente de Hurst (H) (item 4.4.3) e o valor do deslocamento (Russ, 1993; Zhu, 1996; Zahouani *et al*, 1998; Zhou & Lam, 2005; Chen & Shi, 2011; Anexos 3 e 4).

O conceito pode ser extrapolado para simular superfícies irregulares, iniciando com um arranjo retangular, cujo tamanho se aconselha em função das potências de dois mais um pixel central (por exemplo, 33x33, 65x65, 129x129, etc.). Os valores dos cantos se estabelecem como sementes e o valor central é interpolado como a média dos quatro vértices; analogamente ao processo em 1D, o arranjo inicial é dividido em sub-grades e o

processo é repetido segundo o critério do usuário. A Figura 5.10 ilustra o procedimento, os valores sementes são representados com cor cinza, os pontos pretos representam os valores interpolados; o esquema permite ser visualizado na Figura 5.11.

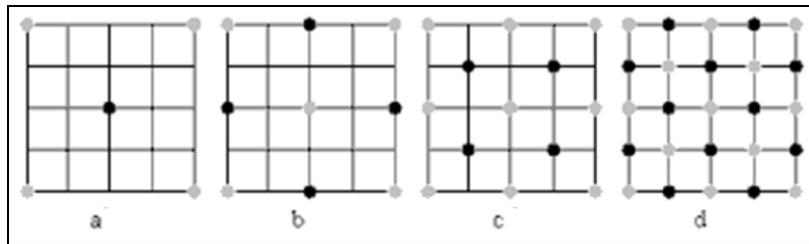


Figura 5.10. Conceito do algoritmo DPM para simular superfícies. Os pontos cinza representam os valores sementes; os pretos representam os valores interpolados.

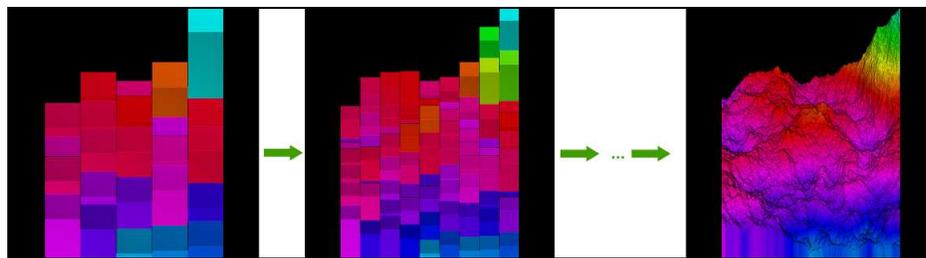


Figura 5.11. Ilustração de terreno modelado mediante o algoritmo DPM. Fonte: <http://www.lotn.org/~calkinse/graphics/mid.html>. Consulta: 29/08/2011

5.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

As superfícies topográficas apresentam uma textura ou rugosidade que varia espacialmente. Estas mudanças estão relacionadas com o conteúdo do substrato litológico superficial e são quantificáveis em termos tangíveis para a engenharia; aliás, existem diversas propostas de parâmetros que designam valores numéricos à rugosidade em cada local onde é estimada, porém, ainda não há consenso na comunidade científica sobre o parâmetro mais apropriado para quantificar a rugosidade.

Existem também métodos de interpolação para criar superfícies topográficas; alguns desses métodos fundamentam-se na teoria dos fractais e servem para melhorar a resolução espacial do arranjo de dados que contém a informação altimétrica da superfície topográfica.

6. PADRÕES DE DRENAGEM

Sem perceber, estamos rodeados pelo fluxo de todo tipo de energias e alguns desses fluxos deixam um traçado no seu trajeto, criando figuras geométricas muito complexas; assim é fácil encontrar padrões de drenagem cotidianamente, seja nos elementos texturais do relevo, na configuração das nossas veias ou até num copo após beber iogurte (Figura 6.1)



Figura 6.1. Padrões de drenagem aparecem cotidianamente, num copo após beber iogurte (superior-esquerda), na forma das nossas veias (superior-direita) ou nos rios e elementos texturais do relevo do DF (inferior). Fontes: Imagens superiores, do autor; imagen inferior tomada de Google Earth™ (21/07/2011)

Padrões de drenagem se referem ao arranjo espacial dos cursos fluviais, mais ζ o que significam? A natureza é “preguiçosa”, seus processos buscam o caminho de menor consumo de energia, de maneira que os padrões geométricos resultantes são produto de uma dinâmica de otimização energética. A forma das drenagens no relevo reflete o estado de equilíbrio entre as forças telúricas e o clima num dado substrato, assim, a configuração do embasamento litológico superficial tem relação com a geometria das drenagens.

Existem relações entre as componentes de um sistema, evidenciando os agregados dessas componentes como função de um todo. Desde as primeiras manifestações da morfometria de drenagens (finais do século XIX) surgiram muitos parâmetros associados à

geometria dos rios, bacias e conjuntos de drenagens; esta abordagem tenta separar e decompor o sistema de drenagem até desagregá-lo ao máximo possível, no entanto as tendências modernas buscam paradigmas que contemplem a unidade de todos os componentes.

Este capítulo sintetizará os conceitos clássicos da morfometria de drenagens introduzindo um acoplamento com a abordagem fractal, de face aos objetivos da pesquisa. Esclarece-se que não se pretende desprezar o conhecimento clássico, mas sim explorar outras alternativas que agreguem novas conclusões ao estado da arte.

6.1 MORFOMETRIA DE DRENAGENS

Uma mudança de direção ou de forma na linha de drenagem ou na superfície do relevo constitui uma mudança de elemento na textura; muitas mudanças constituem uma rede textural, assim, a classificação das redes de canais sempre esteve entre os principais interesses dos pesquisadores (Horton, 1945; Schumm, 1972, 1978; Zăvoianu, 1978), introduzindo o conceito de “ordem de estruturação”, o qual se refere à regularidade de organização dos elementos da drenagem, qualificando a complexidade do sistema ou nível de ramificação da rede de canais.

Vários sistemas de classificação da ordem de estruturação já foram propostos (Figura 6.2) e amplamente discutidos na literatura clássica e contemporânea (Schumm, 1972, 1978; Zăvoianu, 1978; Schuller *et al*, 2001; Rodriguez-Iturbe & Rinaldo, 2001), motivo pelo qual não serão o foco deste trabalho. A análise morfométrica tradicional demanda em primeira instância a adoção de um sistema de classificação, logo se atribui uma ordem para cada segmento da rede de acordo com os princípios do sistema em toda a extensão do conjunto de canais.

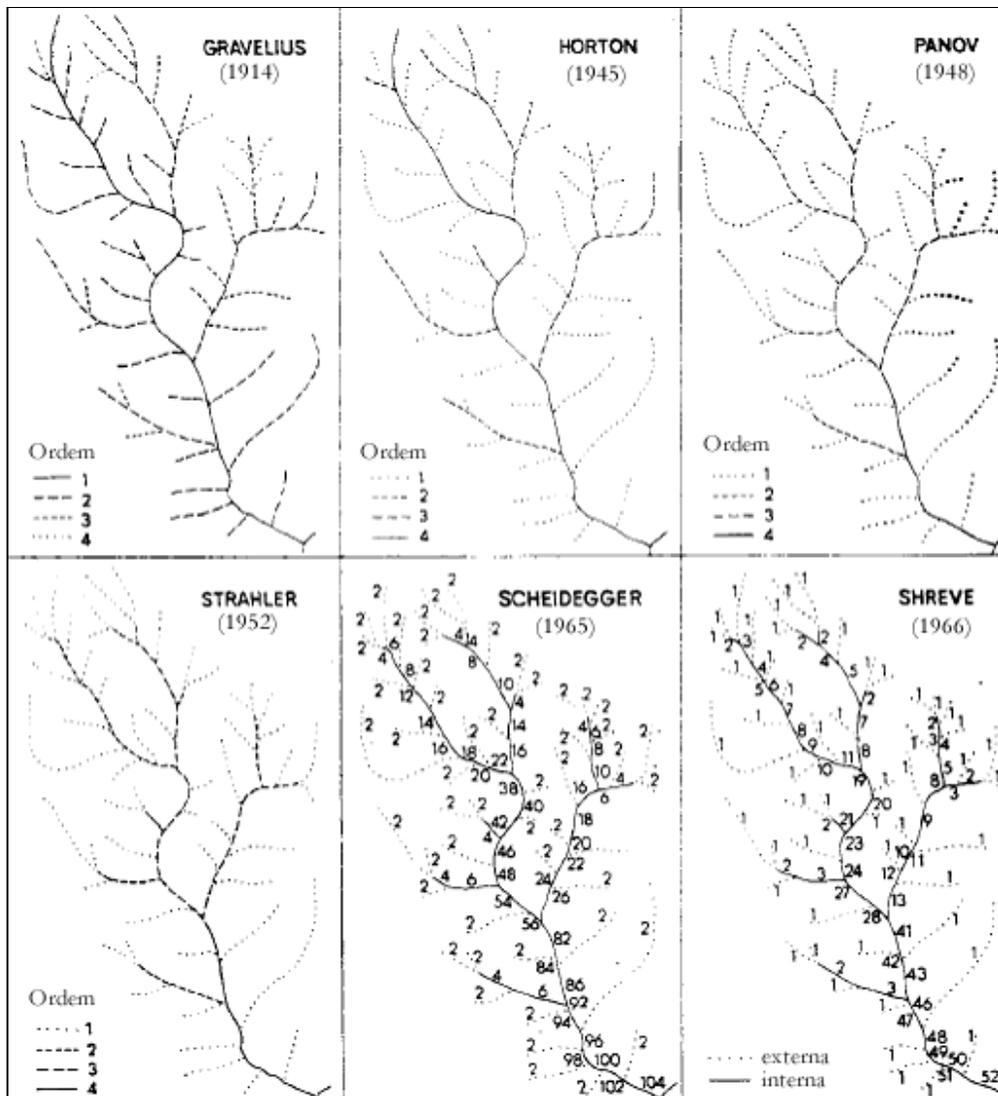


Figura 6.2. Sistemas de classificação do grau de estruturação (Zăvoianu, 1978)

Pode-se dizer que quanto maior é o grau e a ordem de estruturação dos elementos da rede, menor a possibilidade de ser casual; ou seja, a forma das redes de drenagem obedece a fatores geológicos condicionados por uma estrutura geométrica similar. Desta maneira, varias associações entre a complexidade do sistema de drenagem e o substrato litológico/pedológico superficial já foram percebidas em pesquisas previas (Soarez & Fiori, 1978; Zăvoianu, 1978):

- Quanto maior é a densidade de drenagem, menor é a capacidade de retenção da água no substrato e menor é o potencial de infiltração;

- Onde os maciços rochosos são cobertos por espessos mantos de material não consolidado, a densidade de drenagem refletirá mais a espessura e permeabilidade desses materiais;
- Tem-se menor densidade de drenagem sobre rochas mais solúveis, pois se desenvolve escoamento em superfície;

Individualmente, os rios podem ser designados considerando a linha geral do escoamento dos cursos de água em relação à inclinação das camadas geológicas (Christofolletti, 1980; Teixeira Guerra, 1987; Sugio & Bigarella, 1990); em sentido puramente descritivo, os rios seriam classificados em (Figura 6.3):

- Consequentes: Aqueles cujo curso foi determinado pela declividade da superfície terrestre, coincidindo com a direção da inclinação principal das camadas. Tais rios formam cursos de lineamento reto em direção às baixadas, compondo uma drenagem paralela;
- Subsequentes: Sua direção de fluxo é controlada pela estrutura rochosa, acompanhando sempre uma zona de fraqueza (falhas, juntas, camadas, etc.). Nas áreas sedimentares, correm perpendiculares à inclinação principal das camadas;
- Obsequentes: São aqueles que correm em sentido inverso à inclinação das camadas ou à inclinação original dos rios consequentes; geralmente descem das escarpas até o rio subsequente;
- Resequentes: Fluem na mesma direção dos rios consequentes, mas nascem em nível mais baixo, geralmente no reverso das escarpas e fluem até desembocar num subsequente;
- Insequentes: Estabelecem-se quando não há nenhuma razão aparente para seguirem uma orientação geral preestabelecida, isto é, quando nenhum controle da estrutura geológica se torna visível na disposição espacial da drenagem. São comuns nas áreas onde a topografia é plana e em áreas de homogeneidade litológica;

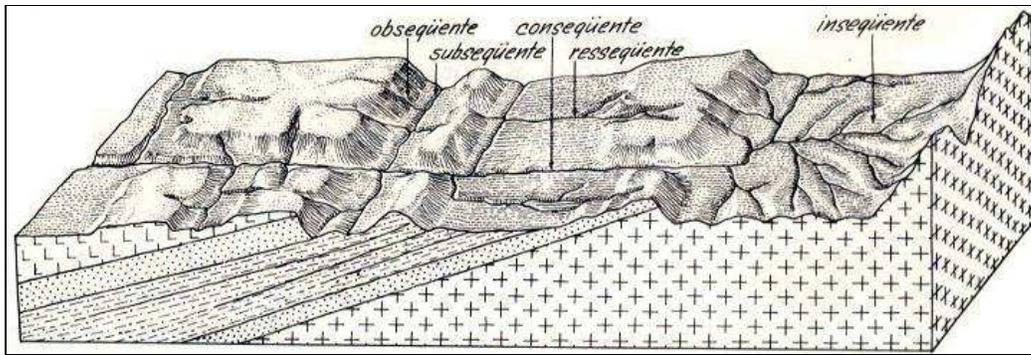


Figura 6.3. Classificação dos cursos de água (Sugio & Bigarella, 1990).

6.1.1 ANÁLISE TRADICIONAL DA FORMA DAS DRENAGENS

A rede de drenagem traçada de forma sistemática e uniforme pode fornecer informações de grande importância, especialmente quanto à estrutura geológica da área; as transições litológicas, podem ser obtidas com rapidez sobre mapas de drenagem. As propriedades mais importantes a serem analisadas a fim de descrever zonas homólogas, (segundo Soares & Fiori, 1978) são descritas sucintamente a seguir (Figura 6.4):

A - DENSIDADE	B - SINUOSIDADE	C - ANGULARIDADE	D - TROPIA	E - ASSIMETRIA	F - FORMAS ANÔMALAS
 ALTA	 CURVOS	 ALTA	UNIDIRECIONAL 	FRACA 	
 MÉDIA	 MISTOS	 MÉDIA	BIDIRECIONAL 	FORTE 	
 BAIXA	 RETILÍNEOS	 BAIXA	TRIDIRECIONAL 		
			MULTIDIRECIONAL 		
			DESORDENADA 		
			ORDENADA 		

Figura 6.4. Propriedades das redes de drenagem segundo Soares & Fiori (1978)

- Densidade de drenagem: avaliação da quantidade de elementos de drenagem por unidade de área;
- Sinuosidade: refere-se ao grau de tortuosidade (qualitativo) desenvolvido por um canal;

- Angularidade: Ângulo de confluência dos elementos de drenagem;
- Tropia: Tendência de se desenvolver numa ou varias direções preferenciais;
- Assimetria: Caraterizada pela vizinhança entre elementos com tamanho ou estrutura sistematicamente diferentes;
- Lineamentos: São elementos fortemente estruturados, retilíneos ou em arco;

6.2 PADRÕES DE DRENAGEM TÍPICOS

As principais fontes clássicas de consulta identificaram vários padrões de drenagem básicos (Zernit, 1932, em Schumm, 1978; Zăvoianu, 1978; Christofolletti, 1980; Sugio & Bigarella, 1990), outros mais complexos podem ser interpretados como conjunções desses apresentados.

6.2.1 DENDRÍTICA

Sua estrutura assemelha-se à configuração dos galhos de uma árvore, caracterizado pela ramificação em todas as direções e confluência dos canais em ângulos agudos. Desenvolve-se onde as rochas oferecem resistência uniforme na direção horizontal. Tais condições são encontradas em camadas planas, plateaus e rochas cristalinas massivas.

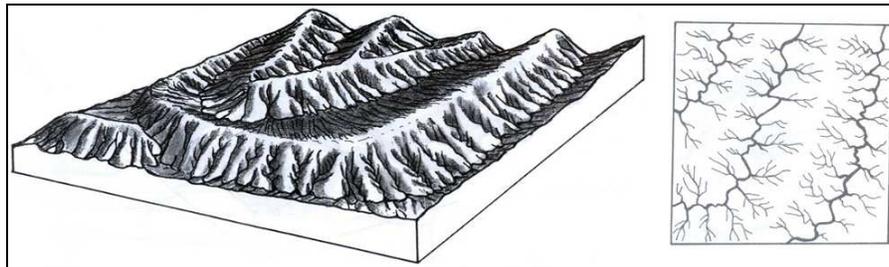


Figura 6.5. Padrão de drenagem dendrítica. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003

6.2.2 TRELIÇA

Caracteriza-se pela presença de canais tributários secundários paralelos ao canal principal, visivelmente alongados e formando ângulos aproximadamente retos com o canal onde fluem. Associa-se com resultados de glaciações e também com dobramentos onde as tributarias paralelas seguem as camadas menos resistentes.

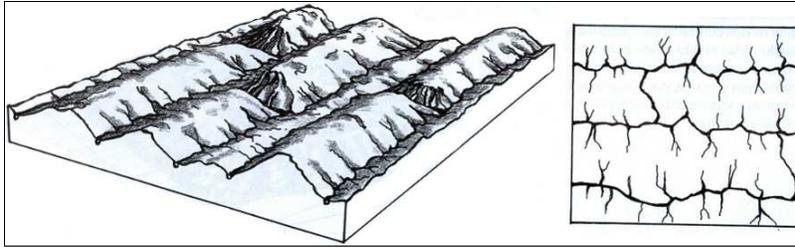


Figura 6.6. Padrão de drenagem em treliça. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.3 RADIAL

Irradiam de (ou para) uma área central, podem ser centrífugas (típico de domos, montanhas e vulcões) ou centrípetas (por exemplo rochas solúveis).

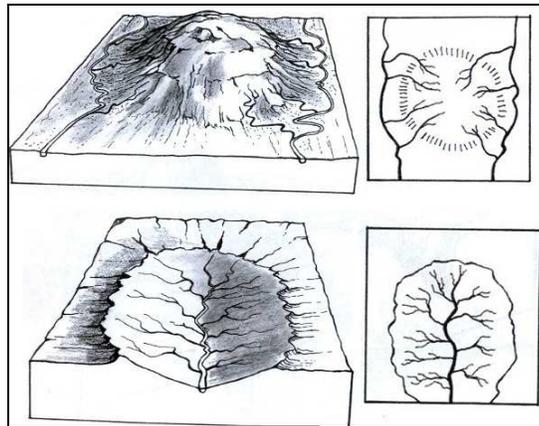


Figura 6.7. Padrão radial centrífuga (superior) e centrípeta (inferior). Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.4 ANELAR

Padrão em forma de anel, geralmente constitui uma drenagem radial evoluida em relevos concêntricos, associada a domos dissecados, o qual evidencia influência da estrutura sobre a declividade.

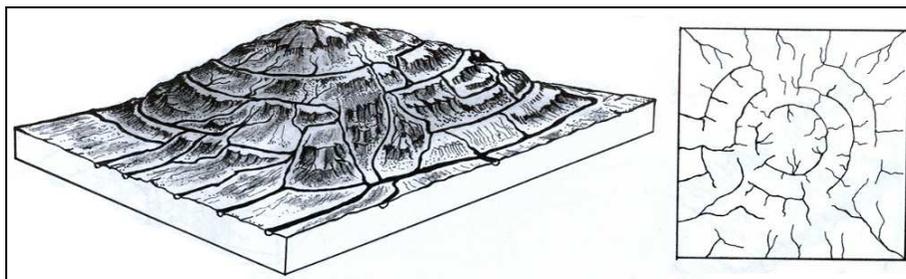


Figura 6.8. Padrão de drenagem anelar. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.5 PARALELA

Caracterizada pela configuração paralela ou sub-paralela de rios pouco ramificados e com espaçamento regular entre si. São típicos em regiões com declividades pronunciadas e/ou controle estrutural, planícies costeiras recentemente surgidas ou planaltos sedimentares muito porosos. Pode expandir-se, transformando-se em drenagem dendrítica

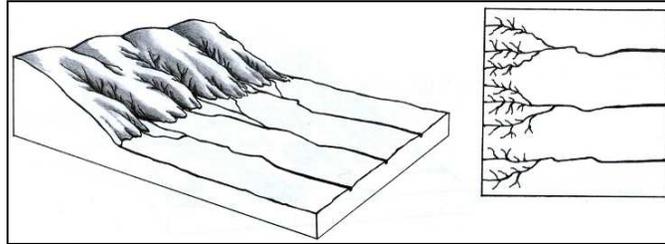


Figura 6.9. Padrão de drenagem paralela. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.6 ABERTA

Também chamada de “exorreica”, ocorre quando os cursos de água de uma bacia organizam-se em forma de rede e dirigem-se, de modo contínuo, até o mar.

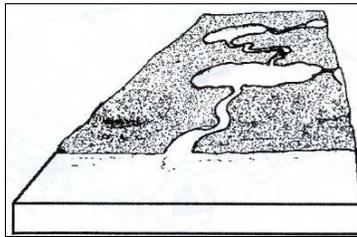


Figura 6.10. Padrão de drenagem aberta. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.7 CÁRSTICA

Também chamada de “criptorréica”, constitui a drenagem que percorre as bacias subterrâneas, como nas áreas cársticas.

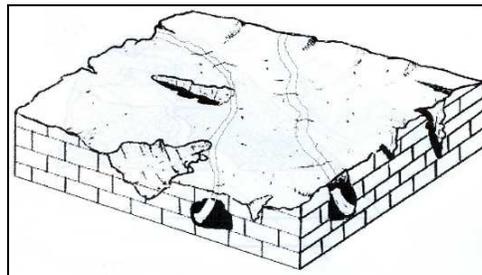


Figura 6.11. Padrão de drenagem cárstica. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.8 DESÉRTICA

Também chamada de “difusa” ou “arréica”, expressa uma drenagem sem estruturação em bacia hidrográfica, como nas áreas desertas. Os escassos cursos de água não têm competência para organizar-se na forma de redes, infiltrando-se rapidamente nos solos arenosos.

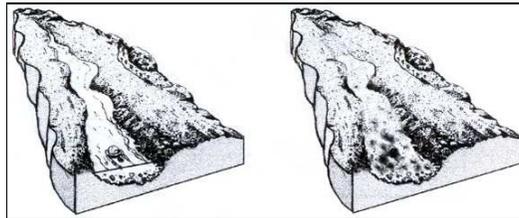


Figura 6.12. Padrão de drenagem desértica. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.9 FECHADA

Também chamada de “endorréica”, configura a drenagem formada por rios periódicos que se dirigem para o interior do continente desaguando numa depressão fechada como os lagos, ou dissipando-se nas áreas arenosas ou cársticas.

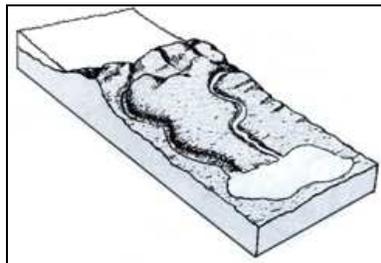


Figura 6.13. Padrão de drenagem fechada. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.2.10 IRREGULAR

Caracteriza-se por ser bastante complexa sem um padrão específico. É bem marcado em planícies glaciais onde o degelo mescla padrões pré-glaciais e pós-glaciais.

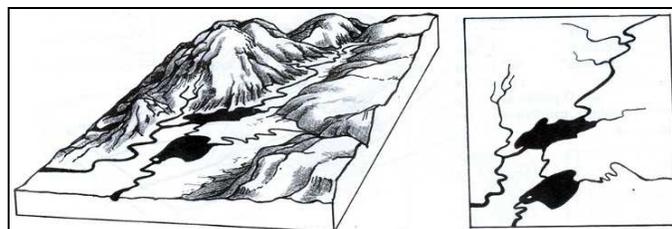


Figura 6.14. Padrão de drenagem irregular. Fonte: Suertegaray *et al*, 2003.

6.3 PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS ASSOCIADOS ÀS DRENAGENS

6.3.1 MORFOMETRIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A área da bacia é delimitada pela divisória de águas vinculando os pontos mais elevados do contorno com bacias vizinhas até o final da seção do canal principal. Este é o elemento que determina a magnitude dos intercâmbios de matéria e energia com as vizinhanças, em relação com as condições fisiográficas locais. Este atributo delimitado num mapa representa a projeção horizontal da verdadeira área topográfica, a qual faz certo ângulo com o plano horizontal em função da declividade média do canal principal.

A largura, comprimento e o perímetro da bacia são usados frequentemente para descrever o tamanho da bacia. Zăvoianu (1978) discute diversas abordagens para interpretar o conceito do comprimento da bacia (L_m); a definição mais aceita sobre o comprimento da bacia seja da distância em linha reta desde a fonte até o ponto mais remoto na divisória de águas (Figura 6.15). A largura da bacia (B) pode ser calculada como a relação entre a área da bacia e a seu comprimento. O perímetro é definido como a projeção horizontal de seu divisor de águas, sempre é menor do que o verdadeiro comprimento.

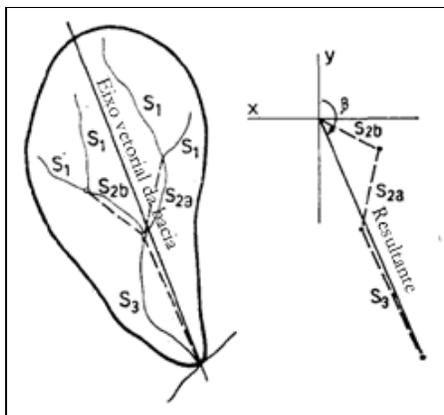


Figura 6.15. Exemplo de um método de estimativa da largura da bacia (Zăvoianu, 1978)

Tentativas para descrever a forma da bacia e relacioná-la com processos hidrológicos já foram feitas (Zăvoianu, 1978) algumas são citadas na Tabela 6.1. Note-se que a descrição da forma da bacia costuma ser expressa com relação a figuras euclidianas tais como circunferências ou quadriláteros, o qual, segundo a visão deste trabalho, não faz sentido físico, dado que as bacias têm formas mais complexas e irregulares (por exemplo, fractais) que não encaixam nas figuras euclidianas.

Tabela 6.1. Índices para expressar a forma da bacia (Zâvoianu, 1978)

Nome	Considerações	Fórmula
Fator de forma [R_f] (Horton, 1941)	Uma bacia normal tem forma de pêra. A_b é a área da bacia, L_m é Largura da bacia	$R_f = A_b / L_m^2$
Coefficiente de compactação [m] (Luchiseva, 1950)	Representa a relação entre o perímetro da bacia (P) e o perímetro de um círculo de igual área	$m = 0.282P / \sqrt{A_b}$
Razão de circularidade [RC] (Miller, 1953)	Cociente entre a área da bacia (A_b) e a área de uma circunferência cujo perímetro iguala ao da bacia (A_c)	$RC = A_b / A_c$
Razão de alongamento [R_e] (Schumm, 1956)	Cociente entre o diâmetro (D_c) de um círculo de igual área do que a da bacia e o comprimento da bacia (L_m)	$R_e = D_c / L_m$
Grau de alongamento [k] (Tolentino <i>et al</i> , 1968)	A bacia tem forma de leque	$k = (P / 2) \sqrt{\pi A_b}$

6.3.2 MORFOMETRIA DE RIOS E CANAIS INDIVIDUAIS

O comprimento de uma corrente é a distância medida sobre o canal, desde a fonte (ponto no mapa onde começa a corrente) até a boca (ponto final no mapa, ou ponto onde o canal intersecta outra corrente, lago ou oceano); usualmente é medido em projeções de mapas. Isso é válido para regiões planas (ou com declividades muito baixas), porém em relevos altos o comprimento real pode variar muito com relação à projeção do mapa; por isto, costuma-se fazer uma correção no comprimento dos canais de drenagem.

As pesquisas (Zâvoianu, 1978) concluíram que devido à diversidade das condições fisiográficas, os canais retos não existem (inclusive, a rigor, em setores curtos). Os cálculos dos coeficientes de sinuosidade comumente usados na literatura especializada (Tabela 6.2) requerem conhecimento do comprimento do canal medido ao longo do seu curso (L_c), a menor distância em linha reta (L_a) entre os dois extremos considerados do canal, e o comprimento L_v do eixo do vale do canal. A sinuosidade pode ser de natureza topográfica ou hidráulica (Figura 6.16)

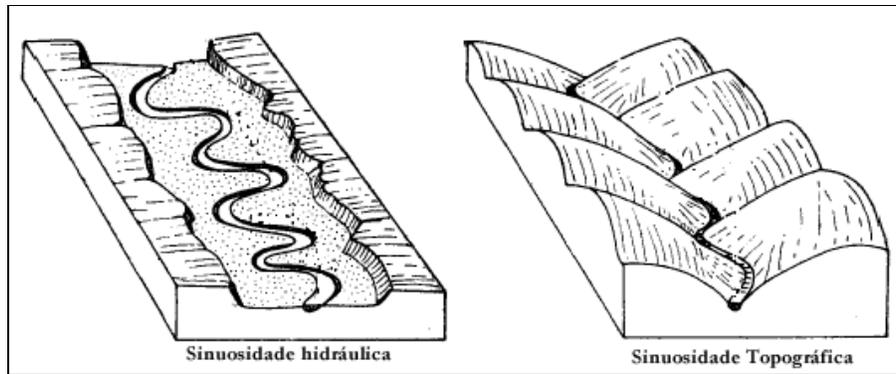


Figura 6.16. Esquemas da sinuosidade hidráulica e topográfica

Tabela 6.2. Parâmetros associados à sinuosidade (Zăvoianu, 1978)

Parâmetro	Fórmula
Coefficiente de Sinuosidade topográfica [T_s] (Mueller, 1968)	$T_s = L_v / L_a$
Coefficiente de Sinuosidade hidráulica [H_s] (Mueller, 1968)	$H_s = L_c / L_v$
Coefficiente de sinuosidade do rio [K_s] (Luchisheva, 1950)	$K_s = L_c / L_a$
Proporção de sinuosidade hidráulica [HSI] (Mueller, 1968)	$HSI = 100(K_s - T_s) / (K_s - 1)$
Proporção de sinuosidade topográfica [TSI] (Mueller, 1968)	$TSI = 100(T_s - 1) / (K_s - 1)$

6.3.3 MORFOMETRIA DE REDES DE DRENAGEM

A densidade de canais (D_{can}) é um importante indicador geomorfométrico que pode prover informação relacionada à resposta da bacia ante os processos de infiltração; é definida como o número de canais na área de drenagem, segundo a Equação 6.1, onde N_{can} é o número de segmentos de canais numa área de drenagem A_d .

$$D_{can} = N_{can} / A_d \quad (6.1)$$

Este é um fenômeno hidrológico relacionado com as características das formações geológicas superficiais, uma breve análise num mapa topográfico revela uma relação direta entre a densidade de canais e a rugosidade do relevo.

A densidade de drenagem difere da densidade de canais, sendo entendida como o comprimento dos elementos de drenagem por unidade de área. Do ponto de vista da hidrologia e da geomorfologia, é um parâmetro importante pois fornece informações sobre a resistência da área de drenagem e o escoamento em superfície, por tal motivo já foi objeto de estudo de muitas pesquisas (Schumm, 1972, 1978; Zăvoianu, 1978), nas quais se abordou a definição do conceito, os métodos quantitativos para o cálculo e as relações de causalidade e interdependência com outros fatores.

Zăvoianu (1978) recopilou varias pesquisas citando diversas relações entre a densidade de drenagem e o meio ambiente circundante:

- Maior densidade de drenagem em áreas com maior precipitação;
- Densidade de drenagem baixa em bacias com alta permeabilidade;
- Valores altos em regiões onde os canais são altamente carregados com material suspenso;
- O mapa de densidade de drenagem será similar a um mapa mostrando a fragmentação horizontal do relevo;

Tentativas de índices para expressar a densidade de redes fluviais são feitas desde os finais do século XIX (Penck, 1894; citado por Zăvoianu, 1978), ainda tendo propostas contemporâneas (Tucker *et al*, 2001; Shahzad & Gloaguen, 2011a). Para fins de concisão, não serão discutidas as propostas de parâmetros de cálculo da densidade de drenagem (posto que é uma discussão ampla que já foi abordada na literatura citada); mesmo assim, chamou a atenção o “método dos pontos de interseção” (Verhasselt, 1961; citado por Zăvoianu, 1978), no qual superpõe-se a rede de drenagem com uma grade cujo tamanho de célula é conhecido (Figura 6.17), e verifica-se uma relação entre o número de pontos intersectados pela grelha e o comprimento total da rede, evidenciando que o número de interseções têm relação direta com o comprimento da rede.

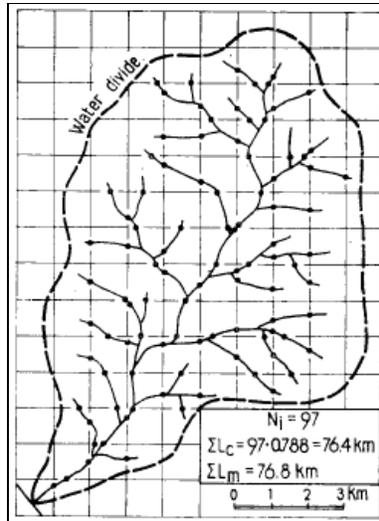


Figura 6.17. Método dos pontos de interseção para determinar o comprimento de uma rede de drenagem. N_i : Número de pontos de interseção; ΣL_c : Comprimento calculado; ΣL_m : Comprimento medido. (Verhasselt, 1961; em Zăvoianu, 1978)

Ao repetir o procedimento em mapas de varias escalas (Figura 6.18), encontra-se uma relação linear entre o comprimento da rede e o número de interseções da grade. Este método é similar ao método da contagem de células para estimar a dimensão fractal, pois procuram uma relação multi-escala entre a resolução da medida e a quantidade de detalhe observado mediante a superposição da rede de drenagem com uma grade regular.

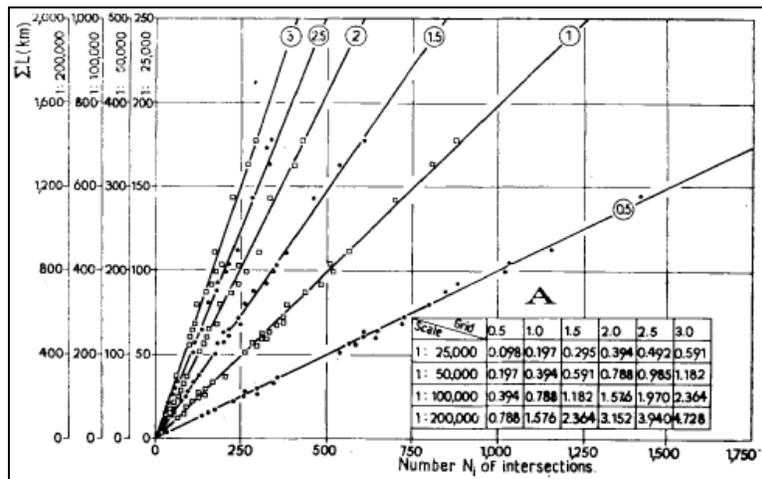


Figura 6.18. Relação entre o comprimento da drenagem e o número de interseções pelo método dos pontos de interseção. ΣL : Comprimento total da rede de drenagem (km); N_i : Número de pontos de interseção para grades quadradas de lado 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 cm, em varias escalas. Tabela com coeficientes a na equação $\Sigma L = aN_i$. (Verhasselt, 1961; em Zăvoianu, 1978)

6.4 ABORDAGEM FRACTAL DOS PADRÕES DE DRENAGEM

Pesquisas demonstraram que os canais individuais e as redes de drenagem são fractais (Mandelbrot, 1982; La Barbera & Rosso, 1989; Takaysau, 1990; Tarboton, 1996; Daya-Sagar *et al*, 1997; Schuller *et al*, 2001; Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2001; Dombrádi *et al*, 2007; Shahzad *et al*, 2010). Também existem tentativas que relacionam a dimensão fractal com atributos dos padrões de drenagem (tais como comprimento, ordem estrutural e área de drenagem), tanto para canais individuais como para redes (Tabela 6.3).

Os hidrólogos têm interesse em calcular duas dimensões fractais (Tabela 6.3), dos canais (como parâmetro da irregularidade e natureza meândrica) e das redes (como medida da habilidade para encher o plano).

Tabela 6.3. Relações entre D_f e atributos das drenagens. L : comprimento do canal ou da rede; L_m : comprimento da bacia; A : área de drenagem; λ : índice de lacunaridade; R_B : razão de bifurcação; R_L : razão de comprimento; R_A : razão de áreas

Autor	Aplicação	Fórmula	Observações
Mandelbrot (1983)	Canais & Redes	$L \propto A^{D_f/2}$	Auto-similaridade em todas as direções
Feder (1988)	Canais	$D_f = 2 \frac{\ln[R_L]}{\ln[R_B]}$	Baseada nas leis de Horton-Strahler (Strahler, 1952)
La Barbera & Rosso (1989)	Redes	$D_f = \max\left(1, \frac{\log[R_B]}{\log[R_L]}\right)$	Baseada nas leis de Horton-Strahler (Strahler, 1952)
Takayasu (1990)	Canais	$L_m = L^{1/D_f}$	Auto-similaridade em todas as direções
Rosso <i>et al</i> (1991)	Canais & Redes	$D_f = \max\left(1, 2 \frac{\log[R_B]}{\log[R_A]}\right)$	Baseada nas leis de Horton-Strahler (Strahler, 1952)
Nikora & Sapozhnikov (1993)	Redes	$L \propto A^{\lambda/2}$	Diferente auto-similaridade na direção leste e oeste

As relações apresentadas na Tabela 6.3 permitem quantificar as feições geométricas dos sistemas de drenagem; a maioria das relações podem ser estimadas mediante análise fractal com base no algoritmo da contagem de células, com exceção de aquelas baseadas nas leis de Horton-Strahler (Strahler, 1952),

Um processo de varredura para estimar a dimensão local em cada ponto de um mapa de drenagem permitirá obter novos planos de informação com a densidade de drenagem quantificada desde zero até dois ($D_f=0$ U $1 < D_f < 2$), onde os valores mais perto de dois representam as maiores densidades de drenagem e o valor zero representa densidades nulas. Esta proposta pode ser aplicada para o conjunto de elementos texturais (drenagens) inteiro, também somente para os canais perenes (onde sempre está fluindo água) ou inclusive para conjuntos separados segundo a orientação dos lineamentos estruturais.

6.5 SIMULAÇÃO DE PADRÕES DE DRENAGENS FRACTAIS

Dois aspectos básicos devem ser considerados para simular redes de drenagem. Primeiro, uma cuidadosa caracterização das propriedades topológicas, a qual é essencial para entender os mecanismos básicos de transporte na bacia. Segundo e mais desejável, um estudo da evolução dinâmica da paisagem (em escalas geológicas). Existem modelos que desenvolvem redes de acordo com regras estocásticas de agregação; quatro das mais citadas na literatura científica, com validade para sistemas de drenagem naturais são (Figura 6.19): i) Modelo de Eden (Eden, 1961); ii) Modelo de Scheidegger (Scheidegger, 1967); iii) DLA ou Agregação por difusão limitada (Witten & Sander, 1981); e iv) Percolação invasiva (Wilkinson & Willemsen, 1983).

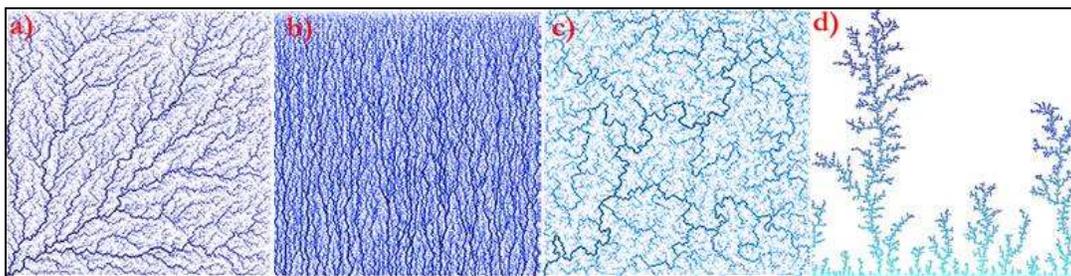


Figura 6.19. Modelos estocásticos de agregação: a) Eden; b) Scheidegger; c) Percolação invasiva; d) DLA. Fontes de a), b) e c): Niemann et al, 2001; Fonte de d): <http://www.joakimlinde.se/java/DLA/index.php>, consulta: 23/08/2011

Os princípios de otimização também têm sido explorados para explicar a tendência das redes de drenagem naturais de evoluir em topologias estáveis e já foi demonstrado que as estruturas resultantes possuem propriedades fractais (Rinaldo *et al*, 1992, 1993; Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2001).

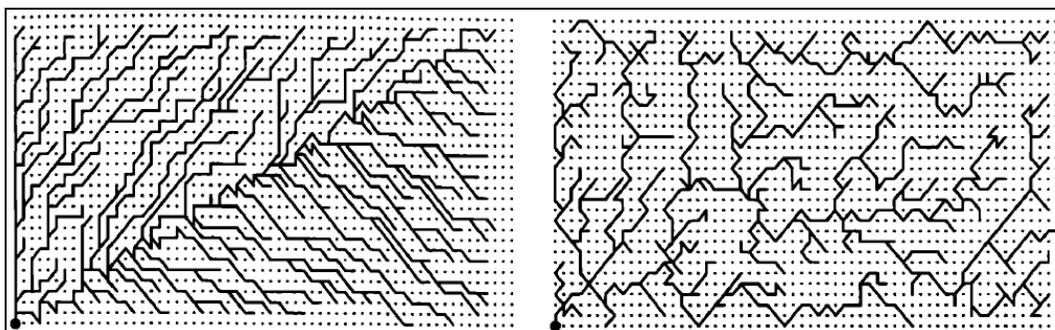


Figura 6.20. Redes de drenagem baseadas em algoritmos de otimização de energia (Rinaldo *et al*, 1993).

Mesmo que estes modelos já tenham sido motivo de diversas simulações e discussões (Cieplak *et al*, 1998; Niemann *et al*, 2001; Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2001) são planares e não abrangem a natureza erosiva inerente à formação das redes de drenagem, pois consideram a agregação da rede independente da superfície de elevação.

Outra forma de desenhar padrões de drenagem é mediante os algoritmos de fluxo que partem da topografia digital, os quais se encontram disponíveis nos módulos hidrológicos dos programas de geoprocessamento (Camara *et al*, 1996; Wilson *et al*, 2008; Hengl & Reuter, 2009; Shahzad & Gloaguen, 2011a); neste caso, a rede resultante depende da superfície de elevação. Pesquisas também demonstraram que as geometrias resultantes são fractais (Dombrádi *et al*, 2007; Shahzad *et al*, 2010).

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS PADRÕES DE DRENAGEM

Vários autores sugerem que os parâmetros morfométricos clássicos usados na modelagem hidráulica e hidrológica variam quando são estimados em mapas de diferentes escalas (McDermott & Pilgrim, 1982; Pilgrim 1986; La Barbera & Rosso, 1989; Al-Wagdany 1993. Em Schuller *et al*, 2001). Neste sentido, a teoria dos fractais pode mitigar o efeito das mudanças paramétricas na escala.

Muito há feito sobre a análise geométrica de sistemas hidrográficos, sendo a densidade de drenagem o parâmetro de estudo mais atrativo aos interesses deste trabalho, devido às relações já citadas entre esta e o conteúdo do substrato litológico superficial.

As abordagens tradicionais começam com a classificação do sistema de drenagem segundo alguma das metodologias ilustradas na Figura 6.2, porém não se conhece uma classificação estrutural que seja espacializável (quer dizer, que permita mostrar a variação da ordem estrutural em cada ponto do espaço).

Para fins da geração de mapas de densidade de drenagem com base na dimensão fractal, considera-se que os estimadores fundamentados nas leis de Horton-Strahler (Tabela 6.3) não permitem aproximar resultados espacializáveis na escala de trabalho desta pesquisa, ou seja, estes estimadores não permitem fazer cálculos locais que produzam mapas de interesse para este trabalho. Por tanto, o método numérico da contagem de células é o mais apropriado para este tipo de produto.

Os algoritmos de fluxo baseados nas superfícies topográficas (os quais estão incorporados nos pacotes de SIG) são os únicos métodos que geram padrões de drenagem coerentes com a superfície do relevo; os outros métodos citados, como os modelos de Eden e Scheidegger, DLA, percolação invasiva e otimização de energia criam redes que podem ser topologicamente parecidas com as redes do terreno, porém não oferecem correspondência espacial com os elementos texturais do relevo.

7. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO

7.1 ASPECTOS POLÍTICOS, HISTÓRICOS E GEOGRÁFICOS

O artigo 3º da Constituição Federal de 1891 determinou que: “Fica pertencente à União, no Planalto Central da República, uma zona de 14.400 km², que será oportunamente demarcada, para nela estabelecer-se a futura Capital Federal”. Nesse mesmo ano foi nomeada uma comissão formada por 22 membros, chefiada pelo astrônomo Luiz Cruls, (diretor do Observatório Nacional), para explorar a zona em questão (Cruls, 1995).

A escolha do local recaiu sobre o trecho do Planalto Central onde se localizam as cabeceiras dos tributários de três dos maiores rios Brasileiros: O maranhão (afluente do Tocantins), o Preto (do São Francisco) e os rios São Bartolomeu e Descoberto (afluentes do Paraná). Na região, segundo palavras do relatório Cruls, “a zona demarcada goza, em sua maior extensão, de um clima extremamente salubre, em que o emigrante europeu não precisa de aclimação, pois encontrará condições climáticas análogas às que oferecem as regiões mais salubres da zona temperada européia.”

A área demarcada do DF abrange aproximadamente 5.800 km²; hoje pouco mais de meio século após da construção do plano piloto de Brasília, o DF possui 19 regiões administrativas reconhecidas pelo IBGE (Figura 7.1) e segundo o mais recente censo demográfico, a população é de 2.570.160 habitantes (IBGE 2010) e a taxa de crescimento anual da população do DF é de 2,77% de acordo com o GDF/PDOT (2005).

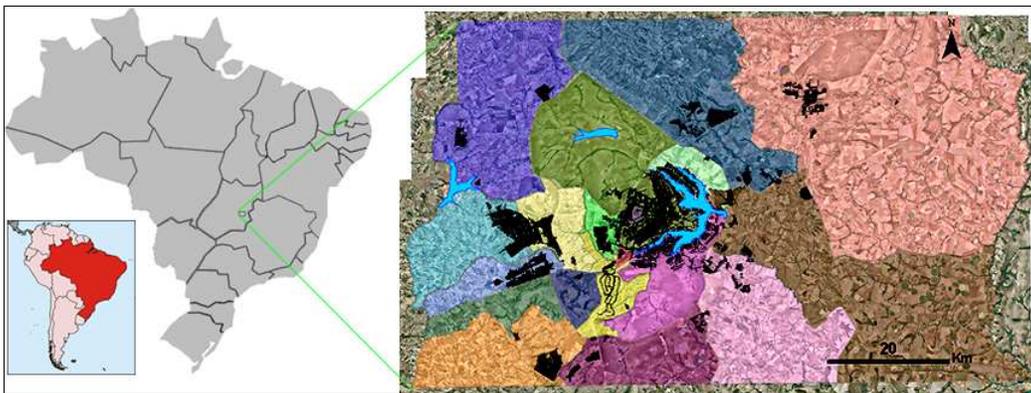


Figura 7.1. DF do Brasil e suas regiões administrativas, área urbana e reservatórios artificiais.

7.2 GEOMORFOLOGIA

O planalto central (e consequentemente o DF) corresponde às remanescentes dos aplainamentos resultantes dos ciclos de erosão desenvolvidos no continente sul-americano durante o Terciário (Martins & Baptista, 1998). A distribuição geomorfológica da região é apresentada na Figura 7.2; as cartas de altimetria, declividade e geomorfologia estão disponíveis nas Figura 7.8 a Figura 7.10.

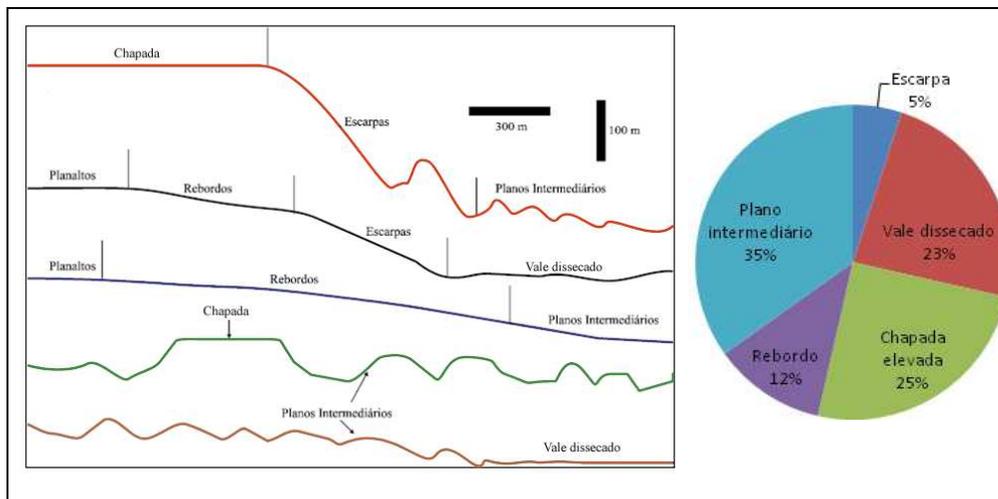


Figura 7.2. Perfis típicos (modificado de Martins, 1998) e distribuição geomorfológica da região

As formas típicas do relevo e o mapa geomorfológico são ilustrados a seguir.

7.2.1 DOMO

Constitui uma elevação do solo em formato de cúpula mais ou menos isolada, resultante do arqueamento convexo de camadas sedimentares basicamente horizontais (Figura 7.3). Constitui-se por deformações locais nos estratos, podendo atingir até 300km de diâmetro. O plano piloto de Brasília está situado sobre um domo

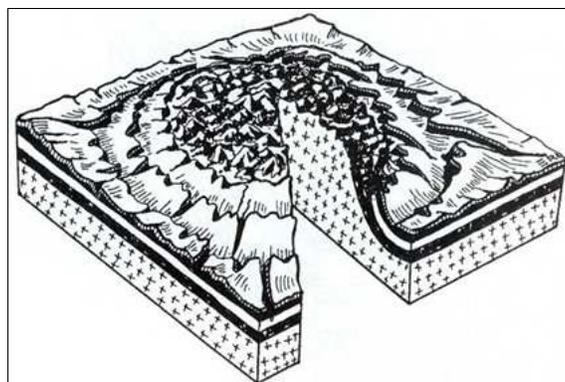


Figura 7.3. Domo. Fonte: Suertegaray et al., 2003

7.2.2 ESCARPAS

São vertentes com acentuadas inclinações, podem ser de origem endógena, tectônica ou de processos erosivos.



Figura 7.4. Esquerda: Esquema da escarpa (Fonte: Suertegaray et al., 2003); Direita: Escarpa na BR-010, Go, Brasil (Imagem do autor).

7.2.3 PLANALTOS

São elevações de superfícies horizontais (Figura 7.5). Sua origem associa-se a processos erosivos que, prolongando-se por muito tempo, ressaltam relevos residuais. Podem apresentar configuração variada, ou seja, formarem-se por um conjunto de morros, colinas, serras e chapadas. No cerrado são muito comuns as chapadas, as quais são planaltos sedimentares com camadas horizontais ou sub-horizontais estratificadas e topos aplainados.

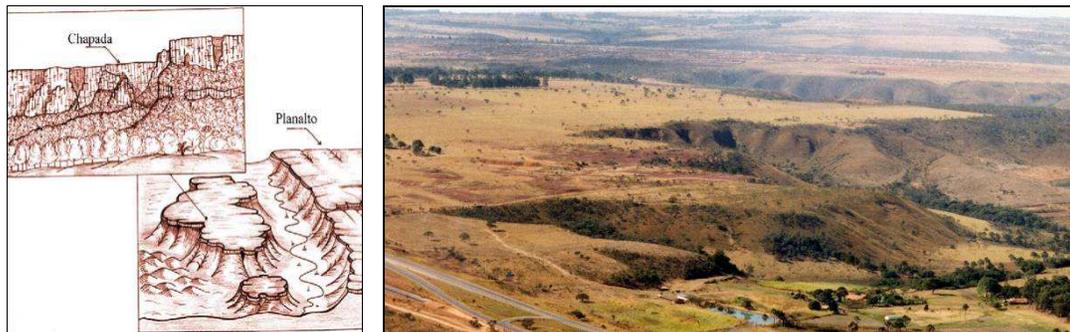


Figura 7.5. Esquerda: Esquema dos planaltos (Fonte: Suertegaray et al., 2003); Direita: Chapada no DF (Fonte: Souza, 1998b).

7.2.4 RELEVOS DOBRADOS

São superfícies topográficas que, devido à dinâmica interna da crosta, apresenta feições em forma de dobra, decorrentes da maior plasticidade da rocha (Figura 7.6).

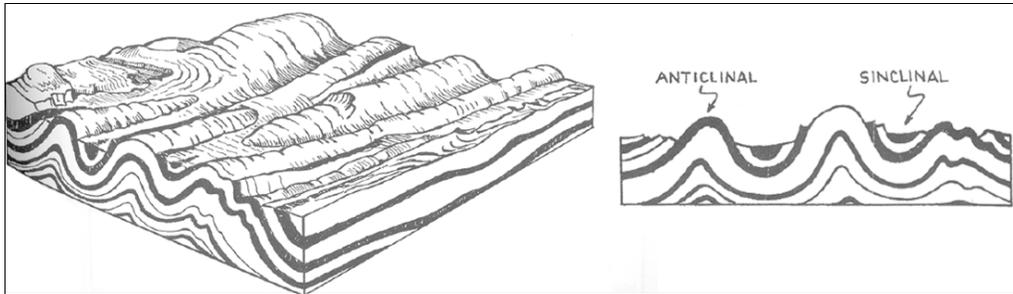


Figura 7.6. Relevo dobrado. Fonte: Suertegaray et al., 2003

7.2.5 VALES DE DISSECAÇÃO

Constituem depressões de fundo descendente, sulcada pelas águas correntes. Sua forma e traçado relacionam-se diretamente com a litologia em que se desenvolve, com o clima e com agentes erosivos que nele atuam.



Figura 7.7. Vales de dissecção no DF. Fonte: Souza, 1998b

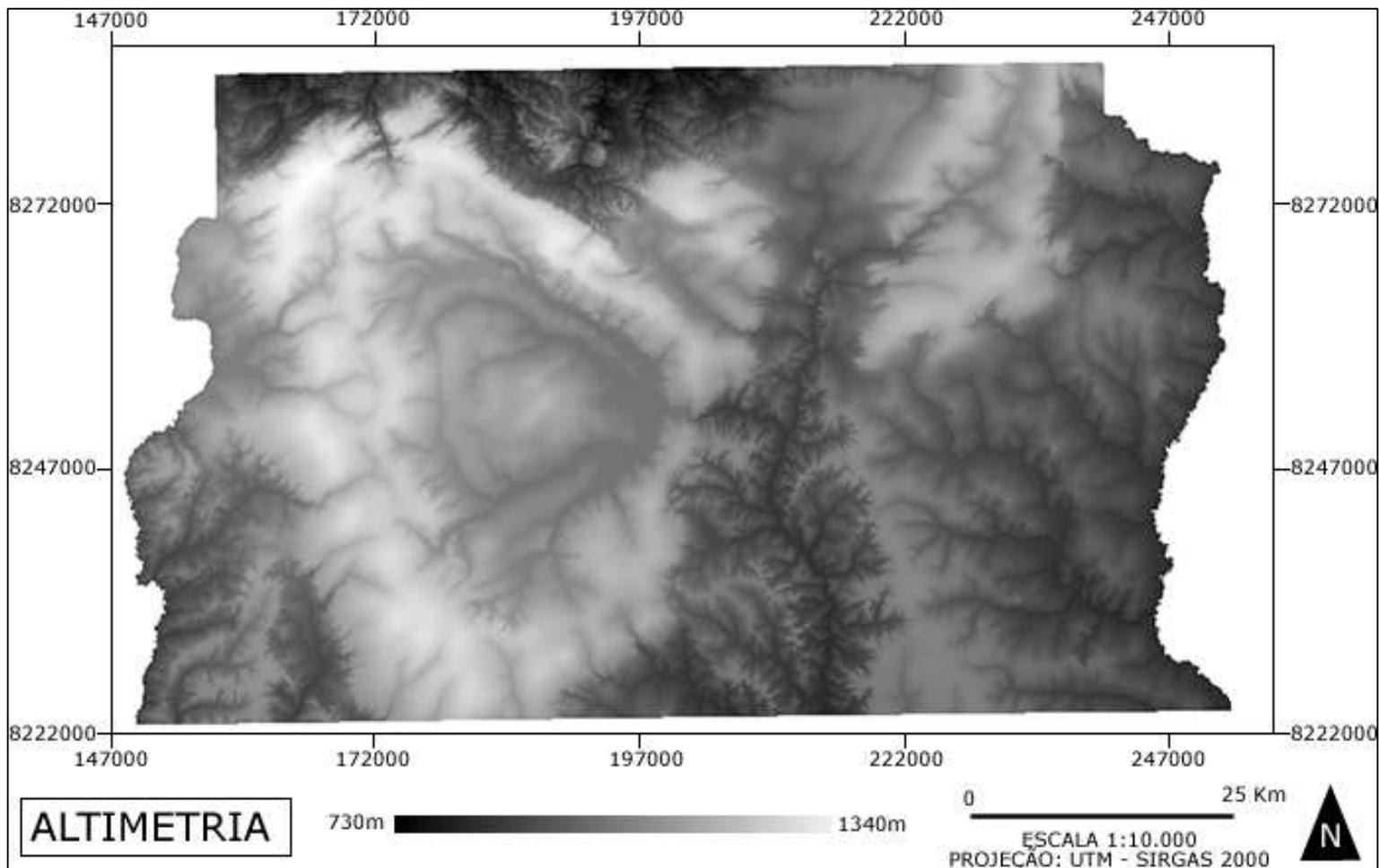


Figura 7.8. Carta de altimetria do DF. Fonte: Terracap (2010)

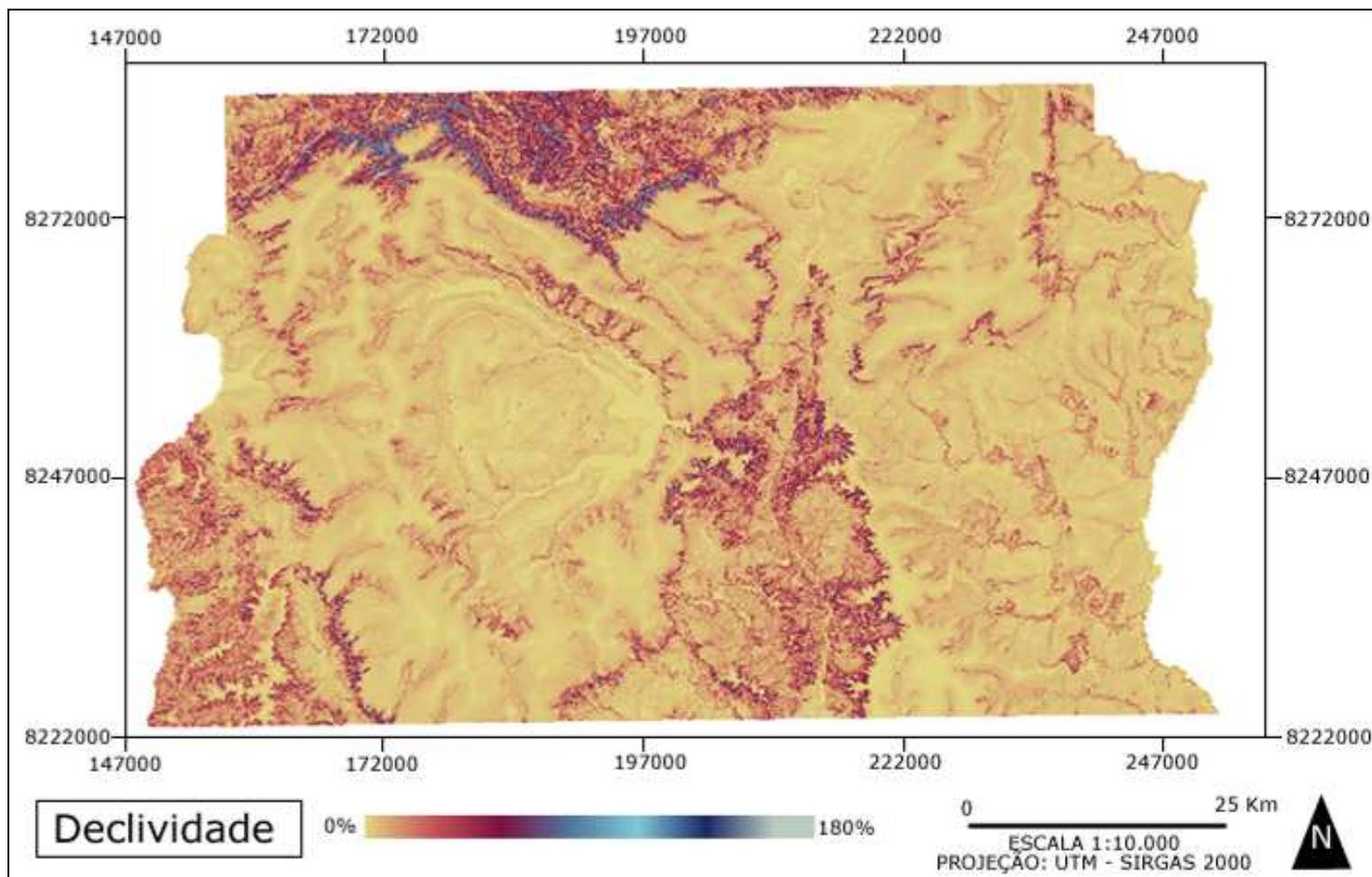


Figura 7.9. Carta de declividade do DF, estimado a partir do mapa de altimetria.

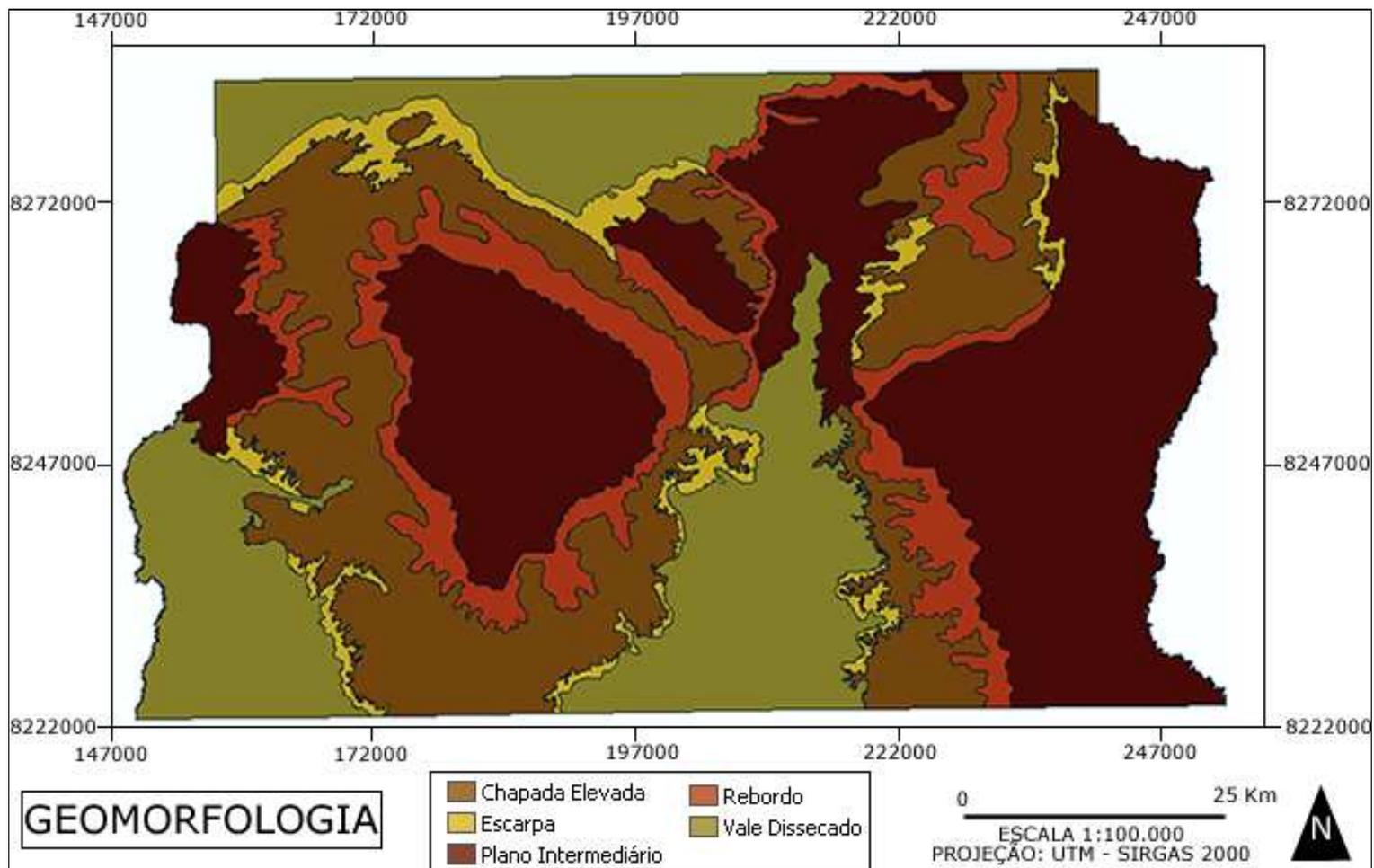


Figura 7.10. Carta Geomorfológica do DF. Modificado de Novaes (1994)

7.3 GEOLOGIA

A história geológica do planalto central começou no fundo do mar, de maneira que sua gênese é sedimentar; mais na frente (em escalas de tempo intangíveis para a engenharia), processos tectônicos puxaram a região à superfície, gerando drásticos metamorfismos (principalmente deformações e dobramentos nas camadas estratigráficas) que aumentaram a complexidade e heterogeneidade geológica e morfológica da região. Após aflorar, a área passou por processos erosivos, principalmente devidos ao regime hidrológico do continente; estes processos erosivos ainda continuam.

A descrição detalhada dos grupos litológicos, em termos da linguagem da geologia, é discutida amplamente nos trabalhos de Aguiar (1997) e Freitas-Silva & Campos (1998) e Arcaya (2007). De maneira geral, a litologia do DF apresenta unidades de substratos rochosos segmentados segundo o indica a Figura 7.11

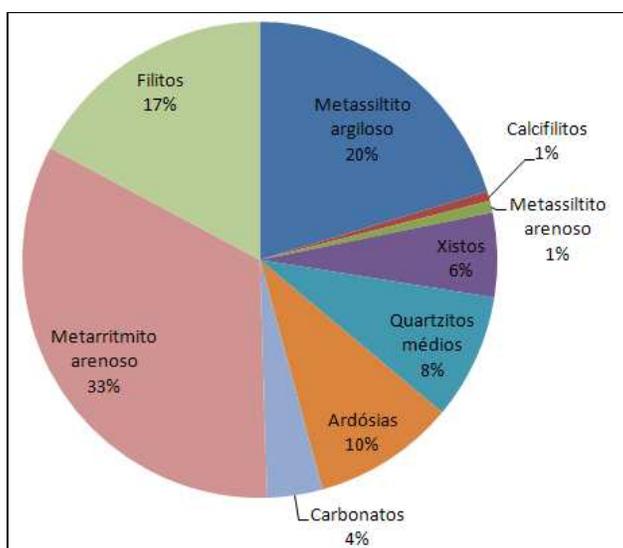


Figura 7.11. Distribuição do substrato rochoso do DF

Os trabalhos de Faria (1984, 1989, 1995) são a base de dados para o mapa geológico atual (Freitas-Silva & Campos, 1998; em Arcaya, 2007). A carta geológica adotada para este trabalho foi diagramado em termos do conteúdo do substrato rochoso, conforme as informações disponíveis no banco de dados; e é apresentada na Figura 7.12

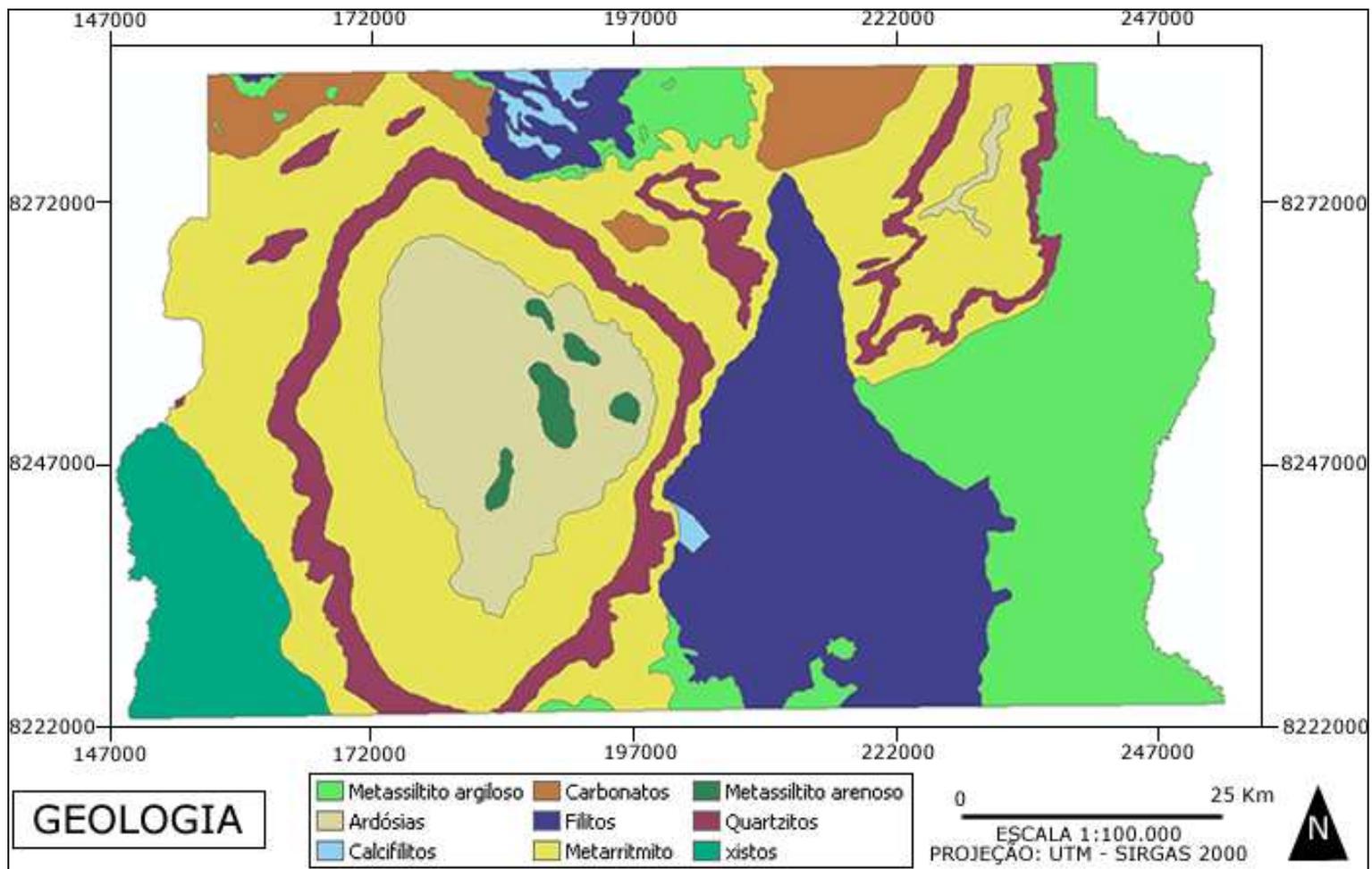


Figura 7.12. Carta litológica do DF. Modificada de Freitas-Silva & Campos (1998).

7.4 SOLOS

Os solos do DF são similares aos solos da região do cerrado com geologia semelhante (Arcaya, 2007). A principal fonte de informações sobre estes solos é o mapa pedológico na escala 1:100.000 disponível pelo serviço nacional de levantamento de solos da EMBRAPA (1978). Classificaram-se sete unidades pedológicas para fins da engenharia geotécnica (Latosolo Vermelho-escuro, LVe; Latossolo Vermelho-amarelo, LVa; Cambissolos, Cb; Solos hidromórficos, HI; Podzólicos, PV; Areias quartzosas, AQ; e outros), as quais são descritas a seguir (Tabela 2.1). A carta de solos é apresentada na Figura 7.14; a distribuição do conteúdo do substrato pedológico é apresentada na Figura 7.13

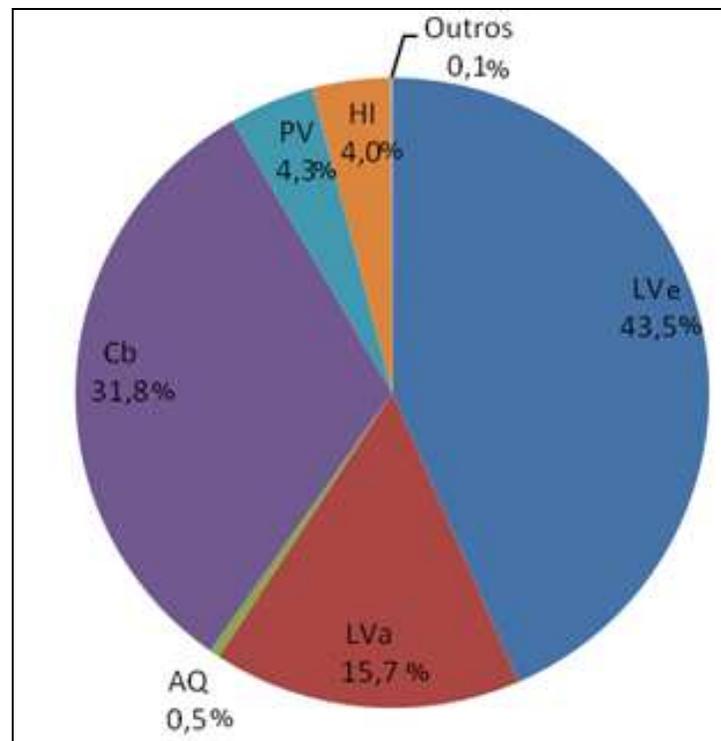


Figura 7.13. Distribuição do substrato pedológico na região. LVe: Latossolo vermelho-escuro; LVa: Latossolo vermelho-amarelo; Cb: Cambissolos; HI: Solos hidromórficos; PV: Podzólicos; AQ: Areias quartzosas.

Tabela 7.1. Classificação pedológica da região

Tipo	Características
LVe e LVa	Bastante permeáveis e com tendência de textura argilosa. Também são aluminosos, muito ácidos e ricos em sesquióxidos. Ocorrem nos compartimentos das chapadas e divisores em planos intermediários, onde o relevo geralmente é plano a suavemente ondulado. A distinção entre os LVe e os LVa está apenas relacionada à cor e ao caráter concrecionário que pode acontecer no LVa.
Cb	Constituído de pequena espessura e com presença de alguns minerais pouco estáveis na sua constituição. Ocorre nas escarpas, planos intermediários e vertentes sinuosas.
HI	Ocorrem tipicamente nos planos intermediários, em torno de drenagens e pequenos córregos, associadas ao afloramento do lençol freático. Os relevos geralmente são planos a suave ondulados. A vegetação de matas galerias é típica desse tipo de solo.
PV	Apresenta textura argilosa com pequenos agregados granulares sub-angulosos, são bem drenados e moderadamente porosos, sobretudo na parte superficial. Essas características associadas ao relevo movimentado conferem a esses materiais uma elevada suscetibilidade à erosão
AQ	Típicos nas bordas das chapadas. A diferenciação em relação aos latossolos deve-se simplesmente à textura, que no caso da AQ tem menos de 15% de material argiloso. Os agregados são de fraca estrutura, compostos de grãos simples de quartzo; isto favorece a colapsibilidade e faz com que esses solos apresentem grande suscetibilidade à erosão. Apresentam alta permeabilidade.
Outros	Na escala de trabalho representam uma quantidade insignificante com relação aos principais tipos de solos. Se compõem de várias classes de solos, principalmente carbonatos, terra roxa eutrófica e brunizem avermelhado.

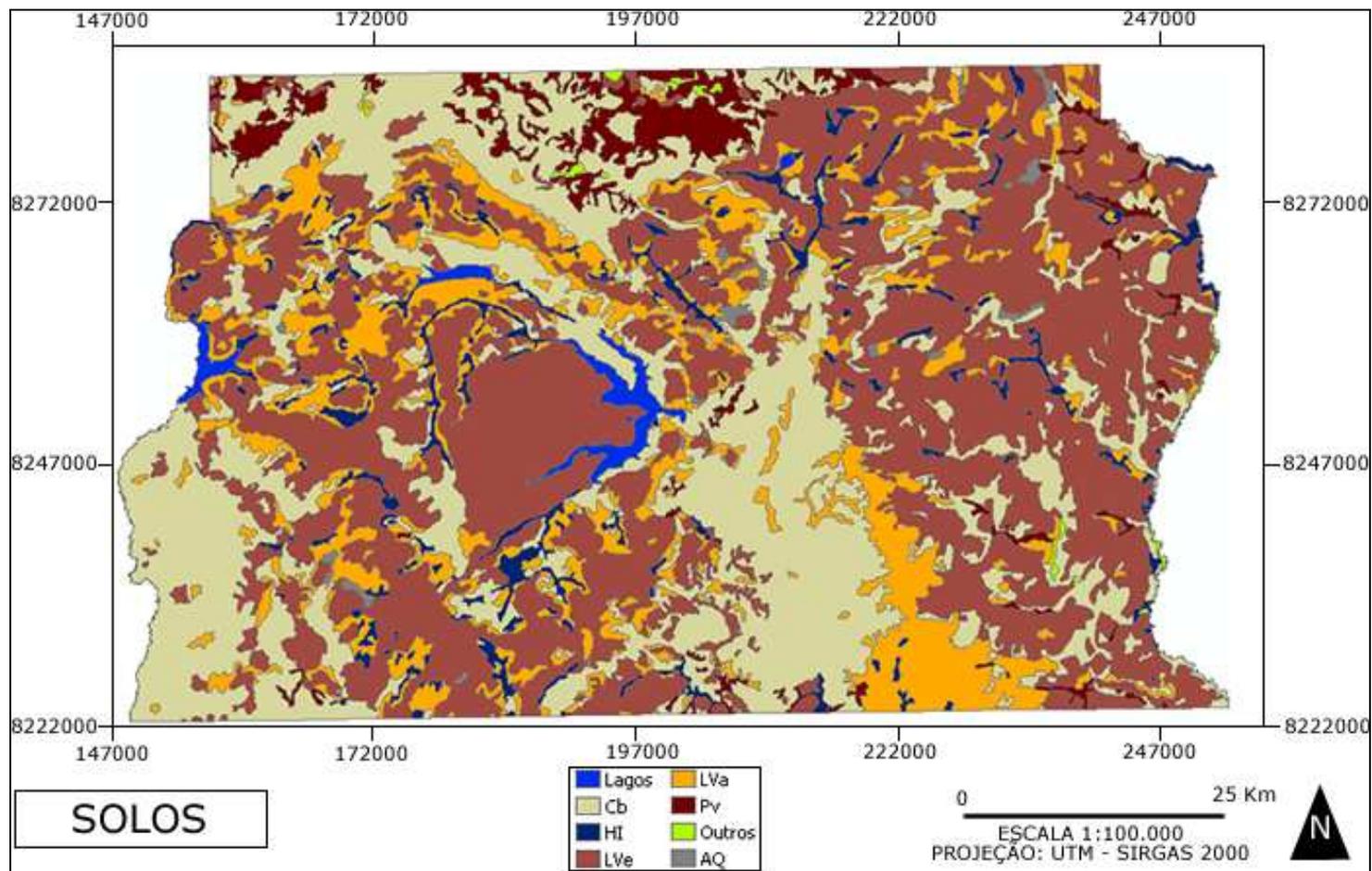


Figura 7.14. Carta de solos do DF. Cb: Cambissolos; HI: Solos hidromórficos; LVe: Latossolo vermelho escuro; LVa: Latossolo vermelho amarelo; PV: Podzólicos vermelhos; Outros: outros tipos de solo; AQ: Areias quartzosas. Modificado de EMBRAPA (1978)

7.5 BIOMA

Podemos definir um Bioma como um conjunto de vida, vegetal e animal, especificado pelo agrupamento de tipos de vegetação e identificável em escala regional, com condições geográficas e de clima similares e uma história compartilhada de mudanças cujo resultado é uma diversidade biológica própria. Segundo Condé (1998) (citado por Arcaya, 2007), o DF (assim como os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso do Sul, parte sul do Mato Grosso, oeste da Bahia e oeste de Minas Gerais) faz parte do bioma do cerrado (Figuras 7.15 e 7.16). Aproximadamente 34% da área do bioma é de alguma forma protegida pelo governo; no DF esta cifra aumenta perto do 42%.

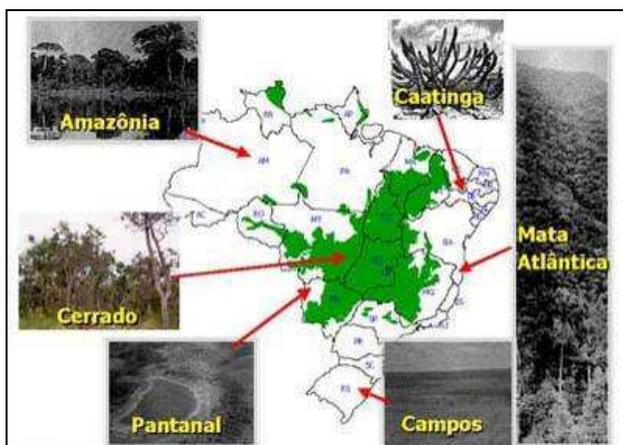


Figura 7.15. Biomas do Brasil. Fonte:

http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_23_911200585232.html. Consulta: 24/jan/2012



Figura 7.16. Bioma do cerrado. Fonte:

http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_23_911200585232.html. Consulta: 24/jan/2012

7.6 HIDROGRAFIA

De acordo com o que já foi comentado no item 7.1, o DF abarca três regiões hidrográficas: Paraná, São Francisco e Tocantins. De acordo com a SEMATEC (1994), aproximadamente 65,5% da área do DF contribui para a bacia do Paraná, 24,2% contribui à bacia do São Francisco e 13,3% contribui para a bacia do Tocantins. O mapa hidrográfico (Figura 7.23) ilustra estas três grandes bacias hidrográficas, o traçado dos canais naturais e reservatórios artificiais.

7.6.1 PADRÕES DE DRENAGEM DO DF

A complexidade geológica da região propicia uma alta variedade de padrões de drenagem, sendo as drenagens dendríticas, em treliça e paralelas as mais comuns na região, como reflexo do relevo dobrado característico na zona.

Também é comum encontrar sistemas híbridos onde são exibidos diferentes padrões em cada escala de observação, desdobrando-se em padrões que contém outros padrões encadeados de maneira hierárquica; por exemplo, a Figura 7.22 mostra um conjunto de drenagens dendríticas que formam um sistema de drenagem paralela, que por sua vez estão contidas numa treliça. Assim por diante, os conjuntos de canais do DF apresentam todo tipo de densidade de drenagem, tropia, assimetria, angularidade e sinuosidade, sendo muito variáveis e espacialmente heterogêneas.

As Figuras 7.17 a 7.22 mostram exemplos de padrões de drenagens típicos no DF

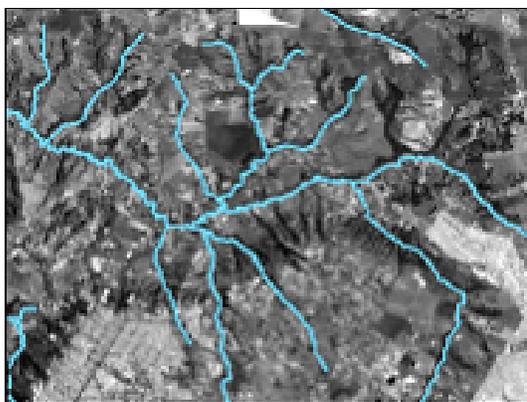


Figura 7.17. drenagem dendrítica; Gama, DF



Figura 7.18. Drenagem paralela. Lago Norte, DF



Figura 7.19. Drenagem anelar.
Plano Piloto do DF

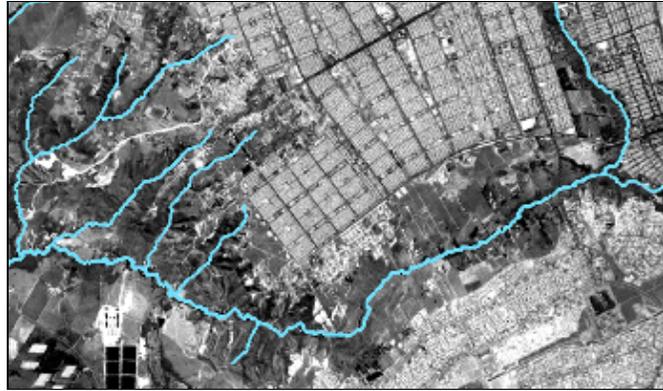


Figura 7.20. Drenagem em treliça; Ceilândia, DF.



Figura 7.21. Drenagem desértica.
Sobradinho, DF



Figura 7.22. Sistemas de drenagens híbridas: Treliça formada por drenagens paralelas, que por sua vez são compostas por famílias de drenagens dendríticas. Sobradinho, DF

7.6.2 HIDROGEOLOGIA

A alta permeabilidade da maioria dos solos e o intenso fraturamento do sistema litológico fazem do DF uma região muito rica em águas subterrâneas; de maneira que praticamente cada uma das unidades litológicas e pedológicas constitui unidades hidrogeológicas. Estes aquíferos podem ser classificados em dois tipos: Porosos e fraturados.

7.6.2.1 DOMÍNIO POROSO

É representado pelo manto de solos; o fluxo é controlado pela geomorfologia e pelo substrato rochoso subjacente, sendo que há diversidade de classes de variada continuidade lateral, tais como aquíferos livres, suspensos e sistemas híbridos.

As características de permeabilidade e espessuras dos domínios porosos são importantes, pois além de controlarem a recarga do fissural tem papel preponderante na infiltração das águas pluviais e suas implicações em situações de risco como os processos erosivos e de inundações. Estes aquíferos (Figura 7.24) apresentam vazões menores que 800 L/h (Tabela 7.2) e embora sejam susceptíveis à contaminação por agentes externos, são aproveitados por poços rasos.

Tabela 7.2. Aquíferos do domínio poroso (Freitas-Silva & Campos, 1998)

Unidade	P1	P2	P3	P4
Permeabilidade média (m/s)	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-7} - 10^{-8}$	$10^{-8} - 10^{-9}$	$>10^{-9}$

7.6.2.2 DOMINIO FRATURADO

São caracterizados pelos meios rochosos, onde a água ocupa o espaço das fraturas, microfraturas, diaclasas, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. A hidrodinâmica é muito variável e em função do tipo de rocha; o principal fator que controla este aspecto é a densidade de descontinuidades do corpo rochoso.

Estes aquíferos (Figura 7.25) são aproveitados mediante poços tubulares profundos e as águas subterrâneas deste domínio apresentam atenuada exposição à contaminação, uma vez que o domínio poroso sobreposto funciona como filtro depurador natural, protegendo a qualidade das águas mais profundas. A recarga do domínio fraturado (Tabela 7.3) se dá através do fluxo vertical e lateral de águas de infiltração a partir da precipitação pluviométrica. A forma do relevo é um importante fator controlador das principais áreas de recarga regionais.

Tabela 7.3. Aquíferos do domínio fraturado (Freitas-Silva & Campos, 1998)

Unidade	Araxá	A	Bambuú	R4	F	PPC	R3/Q3	S/A	F/Q/M
Vazão média (m³/h)	3,1	4,3	5,2	6,14	7,5	9,1	12,2	12,7	33

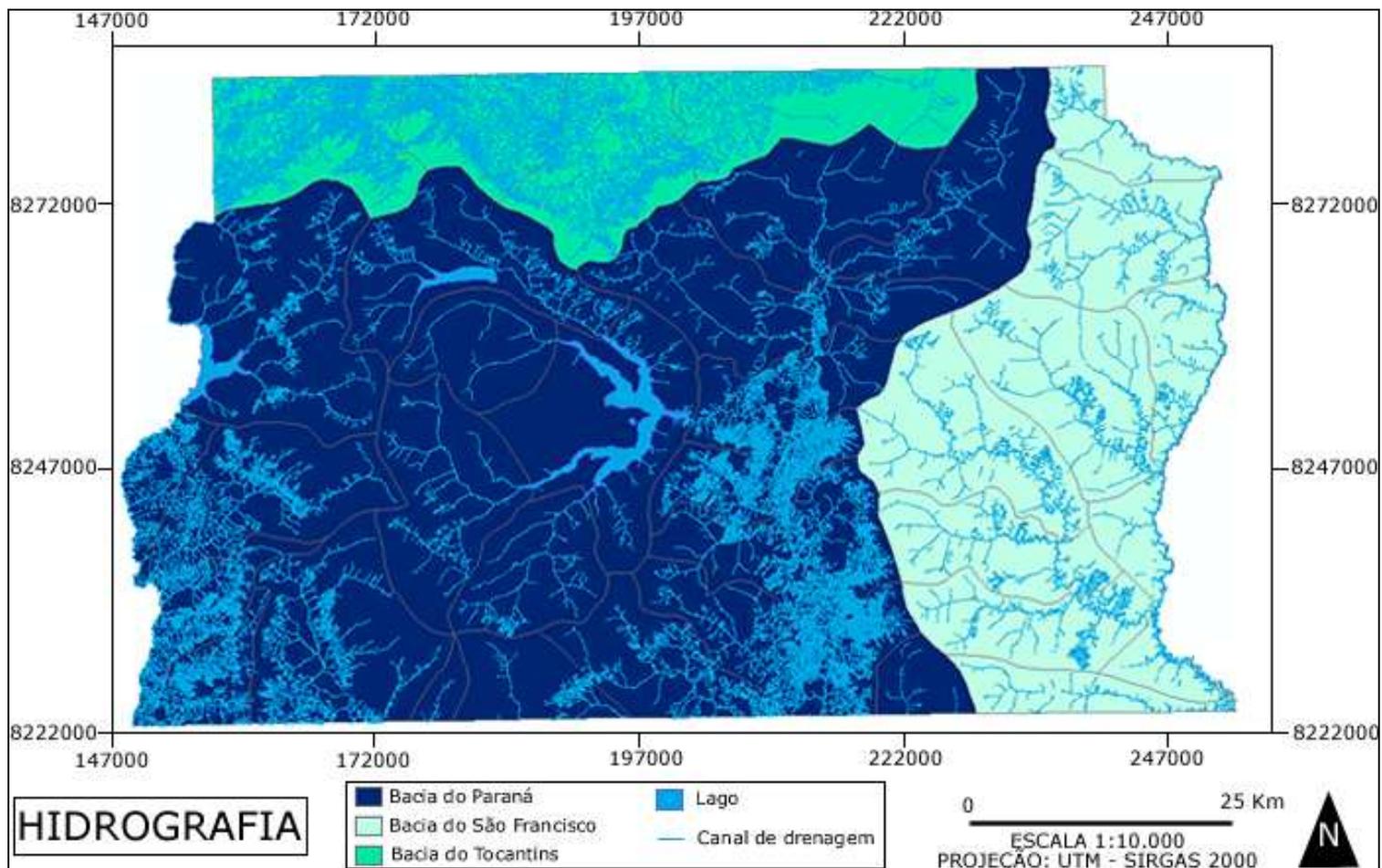


Figura 7.23. Carta hidrográfica do DF. Fonte: Terracap (2010).

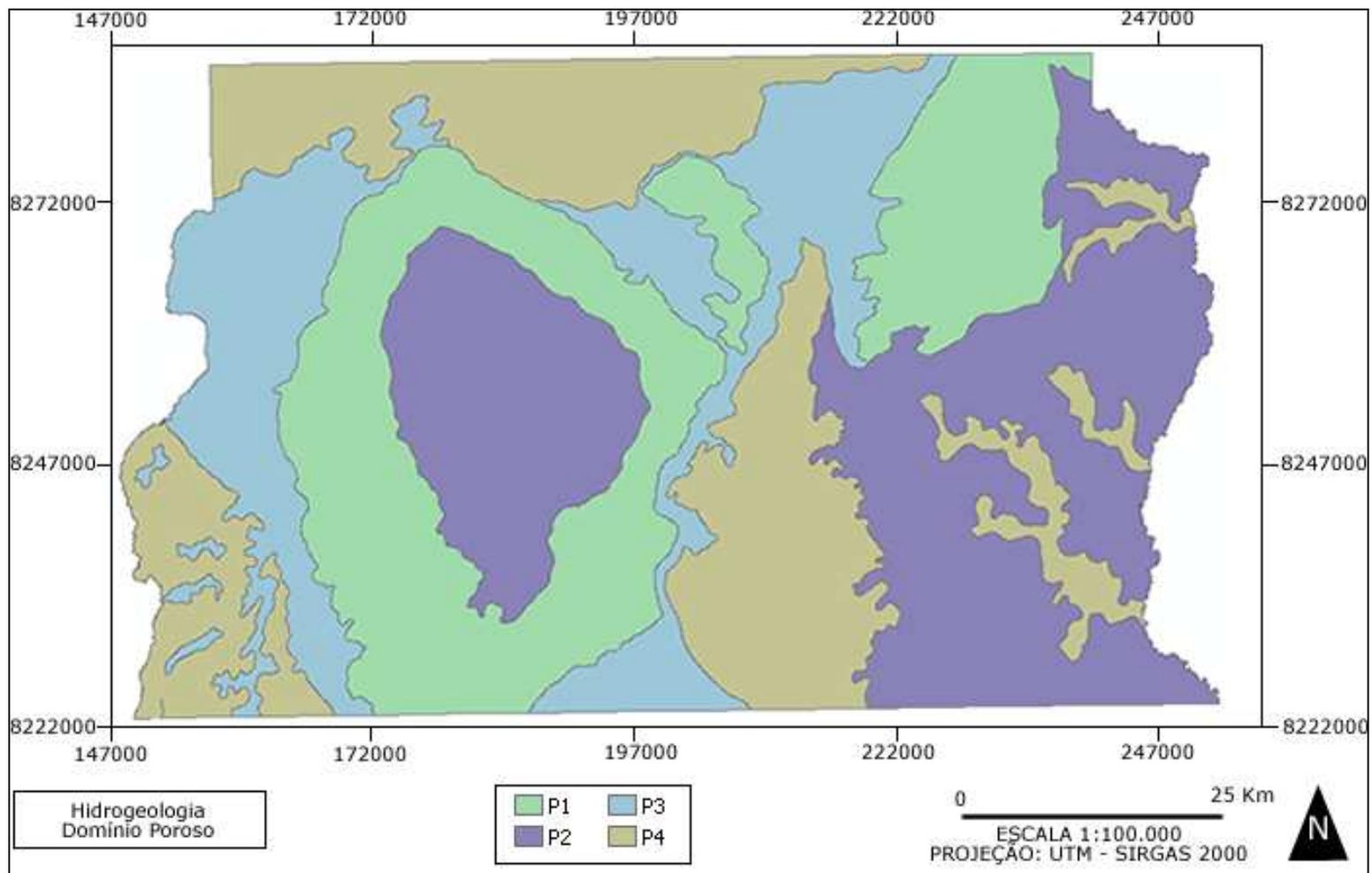


Figura 7.24. Carta hidrogeológica do domínio poroso do DF. Fonte: Freitas-Silva & Campos (1998).

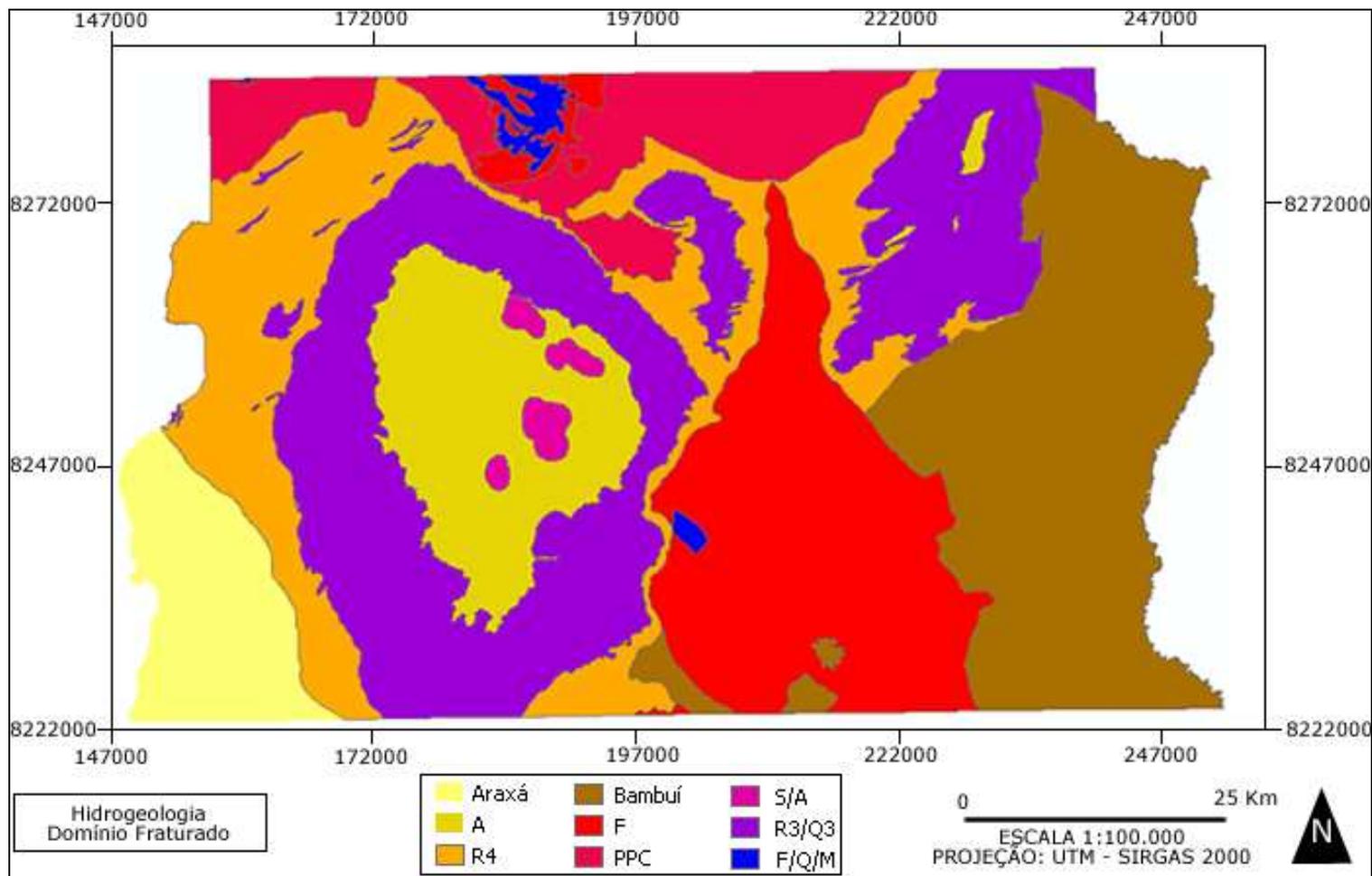


Figura 7.25. Carta hidrogeológica do domínio fraturado do DF. Fonte: Freitas-Silva & Campos (1998).

8. MATERIAIS E MÉTODOS

8.1 COMPUTADORES

O grande tamanho de alguns arquivos espaciais fez necessário segmentar-los em várias seções, processar cada seção separadamente e depois juntar os resultados de cada seção num único arquivo. Outras tarefas precisavam ser executadas paralelamente, de maneira que foram usados três computadores para os processamentos, os quais se usaram simultaneamente durante grande parte do período da pesquisa. Detalhes sobre cada equipamento são oferecidos na Tabela 8.1:

Tabela 8.1. Descrição das computadores usadas.

Tipo	Sistema Operacional	RAM	Processador	Usos
Desktop	Windows XP	1,99 GB	Intel core2 duo	<ul style="list-style-type: none">▪ Armazenamento e manipulação do banco de dados;▪ Análise espacial e estatística
Desktop	Ubuntu 11.0.4	1,99 GB	Intel core2 duo	Processamento de algoritmos fractais
Laptop	Windows XP	2,75 GB	AMD turion dual-core, 2.10 GHz	<ul style="list-style-type: none">▪ Processamento de algoritmos fractais;▪ Manipulação de dados vetoriais;▪ Redação do relatório

8.2 PROGRAMAS DE COMPUTADOR

Além dos programas perenes a qualquer tipo de análise em engenharia (processadores de texto, tabelas de cálculo, editores gráficos, etc.) utilizaram-se programas de maior porte (Tabela 8.2), voltados para necessidades específicas da pesquisa.

Utilizaram-se dois programas de SIG (Spring® e ArcGis®), a princípio isto pareceria pouco lógico, mais durante o desenvolvimento da pesquisa encontraram-se virtudes e defeitos em ambos os programas e cada um complementou o outro. Assim por exemplo, Spring® propiciou vantagens no arranjo do banco de dados, manipulação de informação matricial e processamento espacial e estatístico da informação, porém percebeu-se pouco confortável para manipular informação vetorial; neste aspecto, optou-se pelo uso do ArcGis® para propiciar o conforto durante a manipulação dos dados vetoriais.

Tabela 8.2. Programas utilizados durante a pesquisa.

Programa	Versão	Licença	Usos
Matlab®	R2007a	Acadêmica	Programação de algoritmos fractais
Spring®	5.1.7	<i>Freeware</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arranjo de informação matricial; ▪ Manipulação do banco de dados espaciais; ▪ Programação de algoritmos geomorfométricos não disponíveis nos pacotes de SIG; ▪ Diagramação de mapas
ArcGis®	9.2	Acadêmica	Arranjo de informação vetorial
Autocad®	2010	Acadêmica	Edição da base topográfica e hidrográfica
UltraEdit®	17.30	<i>Trial</i>	Manipulação de arquivos ascii de mais de 1GB

8.3 BANCO DE DADOS

Toda a informação foi recopilada em formato digital a partir de fontes secundárias (Tabela 8.3); não foi necessário realizar trabalho no campo nem no laboratório para adquirir informações.

Tabela 8.3. Descrição do banco de dados.

Informação	Escala	Formato	Fonte
Imagem aerofotogramétrica	1:8.000	geotiff	Terracap (2010)
Mapa geológico	1:100.000	shp	Freitas-Silva & Campos (1998)
Mapas hidrogeológicos	1:100.000	shp	Freitas-Silva & Campos (1998)
Mapa geomorfológico	1:100.000	shp	Novaes (1994)
Mapa de solos	1:100.000	shp	EMBRAPA (1978)
Mapa hidrográfico	1:10.000	dwg	Terracap (2010)
Mapa topográfico	1:10.000	dwg	Terracap (2010)
MDT	1:8.000	geotiff	Terracap (2010)
Mapa de áreas urbanas	1:10.000	shp	Terracap (2010)

8.4 METODOLOGIA DE TRABALHO

A Figura 8.1 resume a maneira como se executou o trabalho uma vez elaborado o banco de dados; os detalhes serão desdobrados no seguinte capítulo.

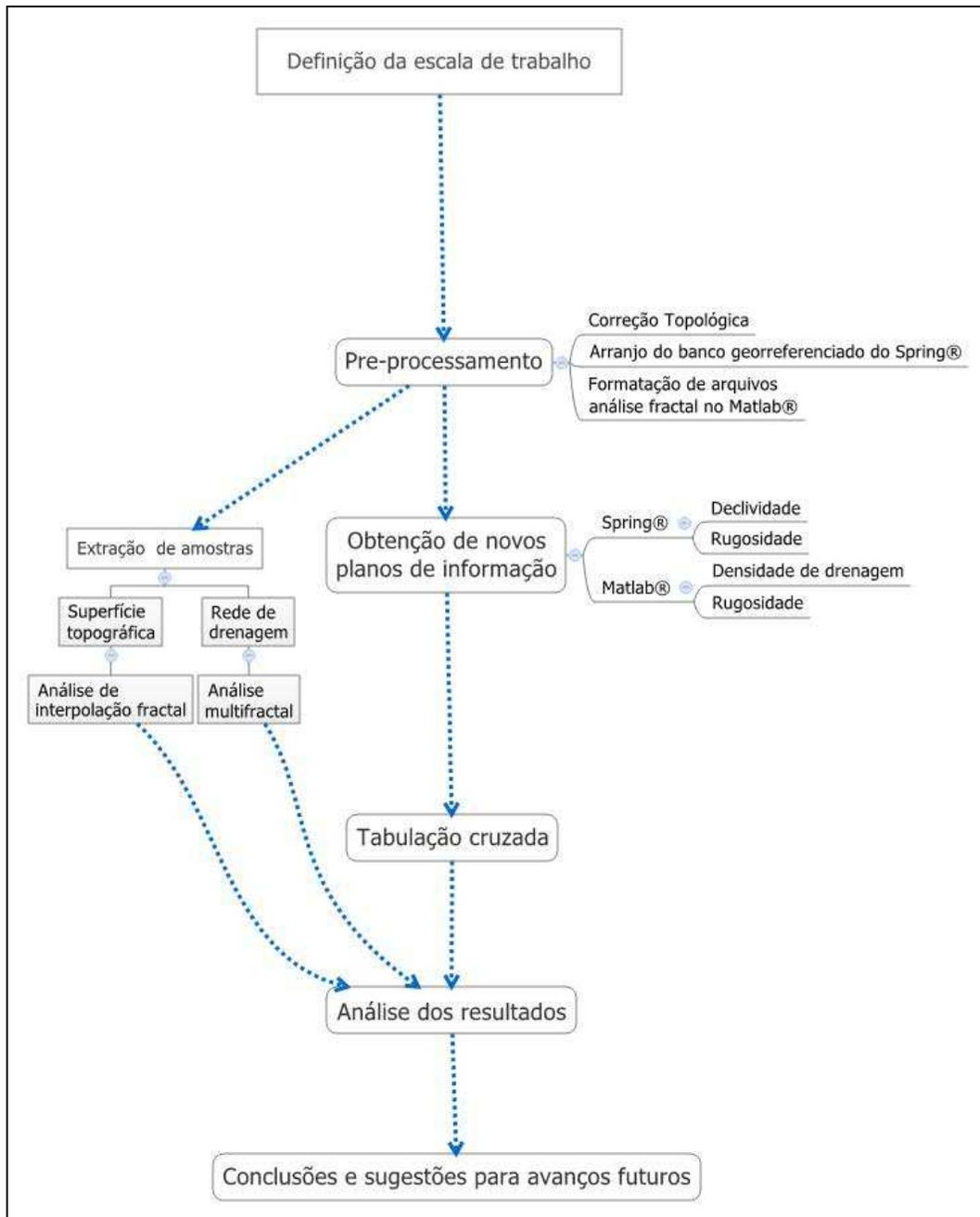


Figura 8.1. Esquema metodológico.

9. ANÁLISES E RESULTADOS

9.1 DEFINIÇÃO DA ESCALA DE TRABALHO

No item 3.1.2.1 foi apresentada uma proposta para determinar o tamanho de pixel apropriado para executar representações *raster* de uma região (Equação 3.1), em função do comprimento de um perfil topográfico amostrado e da quantidade de pontos de inflexão identificados no perfil. Assim, do banco topográfico disponível extraiu-se um perfil (procurando atingir a zona de maior complexidade topográfica para representar a pior situação) e identificaram-se os pontos de inflexão (Figura 9.1)

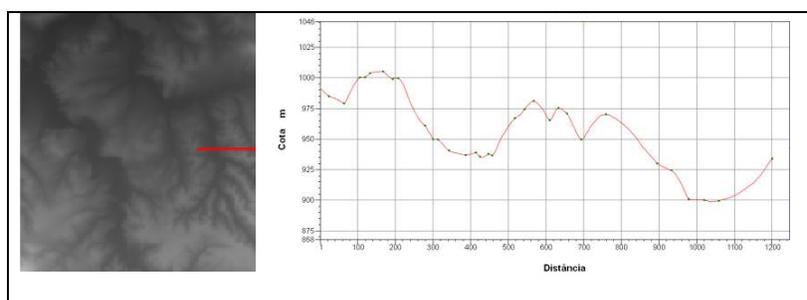


Figura 9.1. Perfil extraído para determinar o tamanho de pixel.

Encontraram-se 30 pontos de inflexão numa faixa horizontal de 1200m, por tanto, segundo a Equação 3.1, o tamanho de pixel do projeto deve ser menor ou igual a 20m. Por sorte, o banco de dados foi dotado de uma resolução de 5m por *pixel*; ou seja, a qualidade do detalhe da informação do banco de dados é muito boa comparada com as sugestões encontradas na literatura.

Esta avaliação do tamanho de célula, reforçada com as informações oferecidas nas Tabelas 2.1 a 2.5, permitiu estabelecer uma escala de trabalho de 1:10.000.

9.2 PRE-PROCESSAMENTO

Os arranjos feitos ao banco de dados recebido são resumidos nos seguintes itens:

- Correção topológica: Descontinuidades nos traçados, superposição de linhas e ausência de dados foram comuns nos arquivos hidrográficos e topográficos. Isto exigiu muito trabalho de CAD para ajustar a topologia da informação. Também foram removidas as lagoas artificiais dos arquivos hidrográficos, já que estas representam ruído para o tipo de análise executado (a análise buscou atingir

somente os traçados dos canais, as células de informação preenchidas pelas lagoas afetam os resultados do algoritmo da contagem de células);

- Formatação de arquivos no banco georeferenciado: Os arquivos recebidos no pacote do banco de dados foram inseridos num projeto georeferenciado no programa Spring®. Isto exigiu a conversão dos arquivos *shp* em formatos matriciais contendo só a informação necessária para a pesquisa, o qual foi feito mediante o programa ArcGis® (por questões de conforto). Os arquivos em formato *geotiff* e *dwg* foram inseridos diretamente no Spring®. Não foi necessário nenhum tipo de correção à imagem aerofotogramétrica;
- Formatação de arquivos binários: A análise fractal programada no Matlab® exigiu que o formato dos dados de entrada (hidrografia e topografia) fosse *ascii* binário (arquivo de extensão *.txt* contendo valores 0 e 1), de maneira que as curvas de nível e os canais de drenagem foram arranjados no ArcGis® e exportados no formato *ascii*. Ambos os planos de informação foram segmentados em várias seções (quatro seções na hidrografia e oito na topografia) para que o tamanho do arranjo fosse ajustado às capacidades dos equipamentos disponíveis;

9.3 ANÁLISE MULTIFRACTAL

O espectro multifractal foi estimado numa sub-região aleatória da rede de drenagem, de tamanho aproximado a 20x20km (ou $2^{12} \times 2^{12}$ células), este foi o maior tamanho suportado pela capacidade computacional disponível para este tipo de análise. Usou-se o algoritmo disponibilizado por Vadakkan (2009) na linguagem de programação do Matlab®, de acordo com as Equações 4.8 a 4.12 usando janelas de partição (ϵ) variando de $2^0 \times 2^0$ até $2^9 \times 2^9$ células. O resultado foi uma curva com forma parabólica, comprovando numericamente que o sistema topográfico da sub-região (e conseqüentemente da área de estudo) é uma entidade multifractal (Figura 9.2), isto é, que as unidades de terreno (ou geo-formas) na região de estudo aparecem contidas dentro de outras geoformas de maior tamanho, concatenadas hierarquicamente de maneira heterogênea.

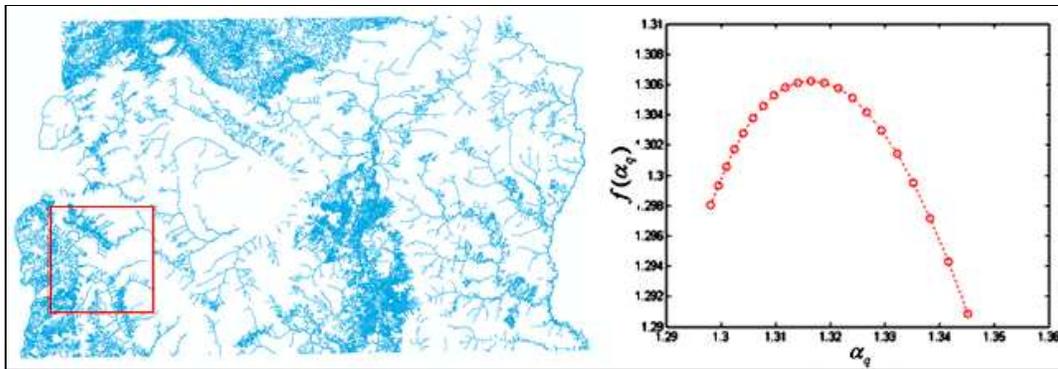


Figura 9.2. Espectro multifractal de uma sub-região aleatória da rede de drenagem

Este conceito das hierarquias heterogêneas significa que há vários tipos de geoformas (e não uma só repetida num processo fractal), como vales, chapadas, morros, entre outros, cada um contendo um subsistema de geoformas dentro de si, que por sua vez contém outros sistemas de geoformas e assim de forma sucessiva e indefinida, variando em diversidade segundo a escala de observação. Isto é uma compreensão óbvia que não precisa de erudição para ser entendida, pois é perceptível a simples vista; o ganho ou novidade neste caso é ter um argumento numérico de bases científicas que permitem quantificar estas percepções em termos tangíveis para fins de cartografia e engenharia.

Para entender a distribuição hierárquica das geoformas na região, aplicou-se também o algoritmo da contagem de células (item 4.4.2) numa sub-região aleatória da rede de drenagem de tamanho aproximado a 60x82km contida numa grade de 82x82km ($2^{14} \times 2^{14}$ pixels, a maior potência de 2 contida na área de estudo); o resultado da nuvem de pontos não foi uma linha reta, dado que neste domínio de escalas não há só uma lei fractal no sistema (mais sim multifractal), sendo que a relação logarítmica entre o detalhe e a resolução foi uma curva fatível de segmentar em três trechos retos, cada um desses trechos representando uma dimensão fractal diferente (Figura 9.3).

O primeiro trecho (vermelho) atingiu linearidade num domínio entre 5m quase 100m de resolução espacial; o segundo trecho (laranja) segmenta um domínio aproximado entre 100m e 800m de abrangência espacial; o último e maior domínio atingido pela escala de trabalho (verde) abrange geoformas compreendidas em tamanhos aproximados entre os 800m e 10km de extensão horizontal. A Figura 9.4 mostra um exemplo da concatenação hierárquica das geoformas na região de estudo

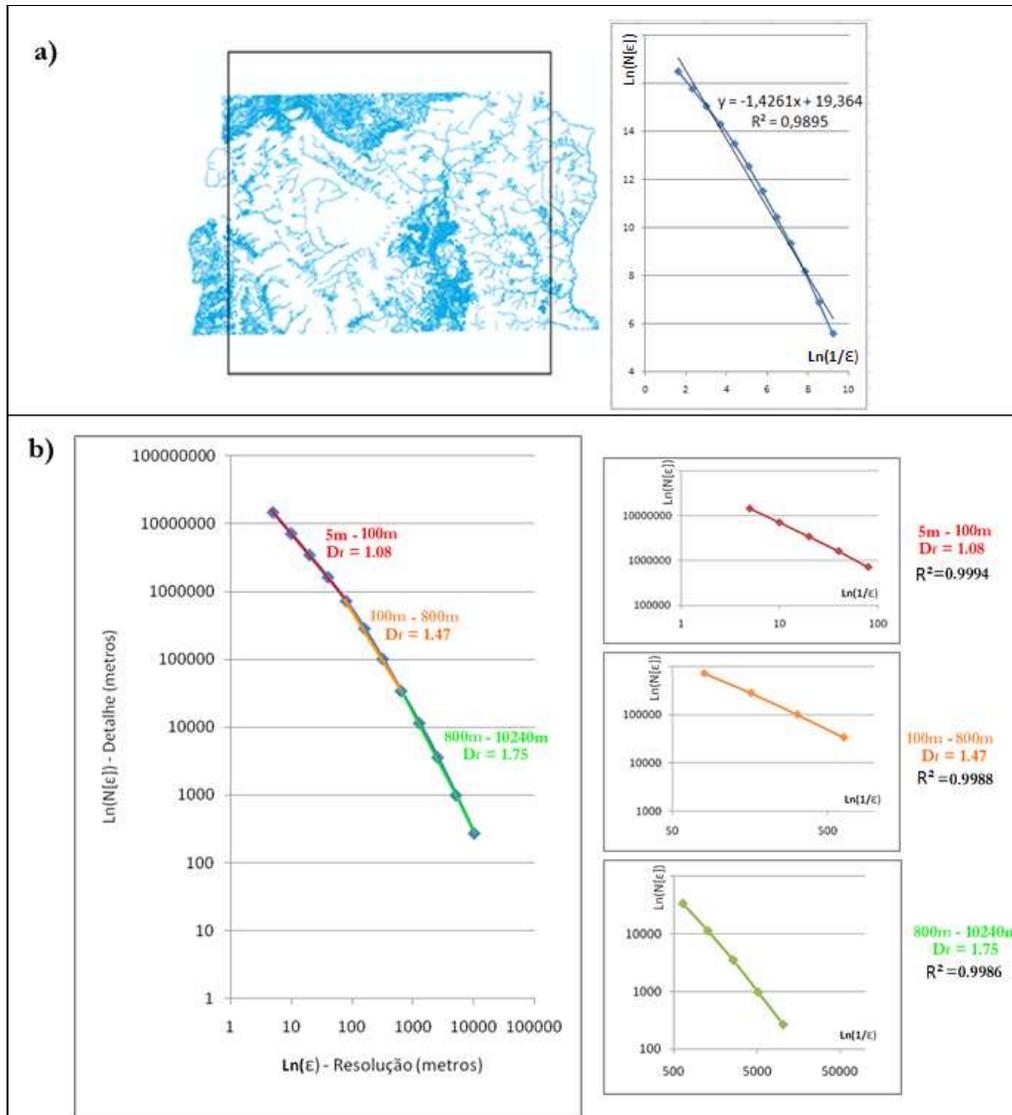


Figura 9.3. Resultados da contagem de células evidenciando as hierarquias do sistema de geoformas na região.

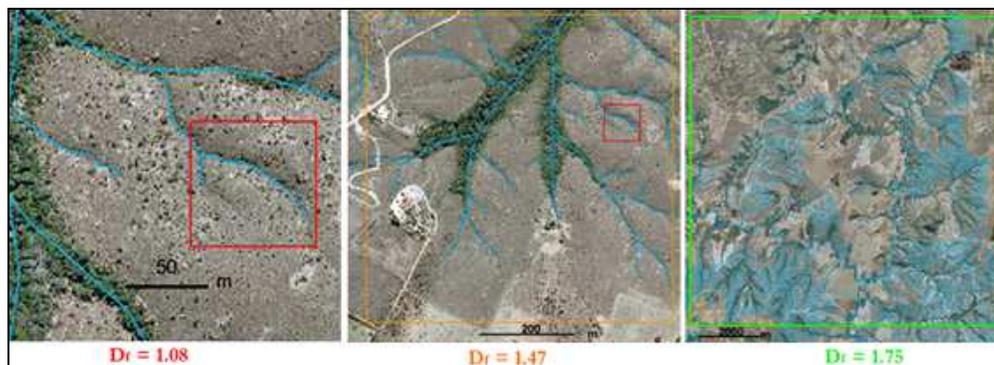


Figura 9.4. Sistema hierárquico desdobrado em três níveis..

Sobre estes resultados afirma-se o seguinte:

- O sistema topográfico do DF é um conjunto heterogêneo de fractais (multifractal);
- Nesse sistema percebe-se uma hierarquia concatenada em três níveis de resolução espacial horizontal, cada um desses níveis pode ser estudado como um conjunto “mono-fractal” separadamente;
- É sugerido para as análises geomorfológicas e morfométricas no DF considerar os domínios de escalas espaciais propostos nestes resultados;
- Os níveis hierárquicos continuam desdobrando-se em níveis de resolução que não foram abrangidas por esta análise, tanto na micro-escala como na macro-escala;

9.4 CARTAS BASEADAS NA DIMENSÃO FRACTAL

Foi programado um algoritmo no Matlab® (Anexo 1) para receber uma imagem binária e estimar a dimensão fractal em cada célula da imagem, conforme aos conceitos apresentados nos itens 4.4.2 e 4.4.5. A partir da carta hidrográfica e da carta topográfica, calcularam-se as cartas de densidade de drenagem (representada pela D_f dos traçados dos canais hidrográficos) e rugosidade topográfica (estimada como a D_f da projeção horizontal das curvas de nível).

Para o caso de estudo, designou-se à janela móvel um tamanho de 128x128 pixels, variando o tamanho da grade da contagem de células com valores de 1, 2, 4, 8, 16 e 32 pixels. Para respeitar a coerência física dos parâmetros, realizaram-se alguns ajustes (Tabela 9.1), pois linhas com dimensão menor do que um não têm sentido físico para o caso prático analisado. A Figura 9.5 apresenta um exemplo dos resultados obtidos.

Tabela 9.1. Ajustes aos parâmetros estimados

Parâmetro	Condição	Ajuste
Densidade de Drenagem	Se $0 < D_f < 1$	$D_f = 1$
Rugosidade	Se $D_f < 1$	$D_f = 1$

Os histogramas de frequências de ambas as cartas (Figura 9.6) mostram a distribuição dos valores da D_f , a maioria dos valores da densidade de drenagem foram nulos ($D_f=0$), o qual exigiu ampliar o resto da faixa de valores num *zoom*; note-se que há concentração nos

valores baixos (em ambos os parâmetros), o qual reflete a predominância dos solos lateríticos na região (LVa e LVe), caracterizados por configurar regiões planas e com ausência de canais de drenagem.

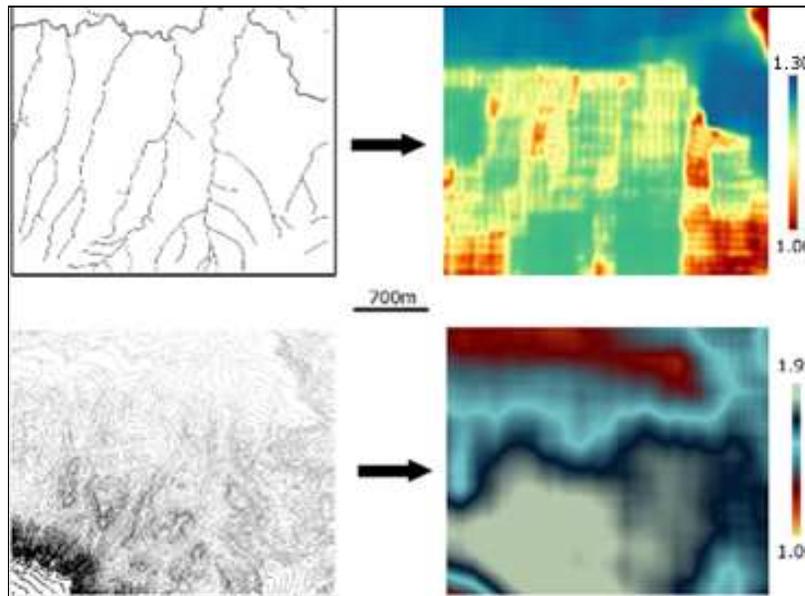


Figura 9.5. Exemplos da densidade de drenagem (superior) e da rugosidade (inferior) baseados na D_f dos padrões de drenagem e das curvas de nível, respectivamente

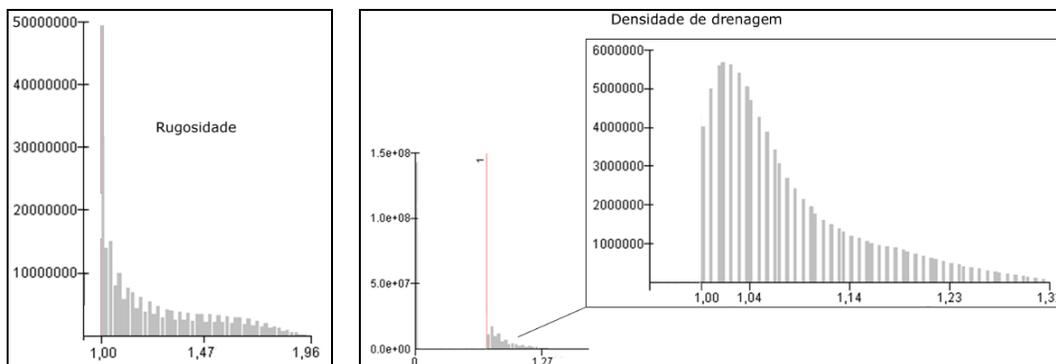


Figura 9.6. Histograma de frequências da rugosidade (esquerda) e da densidade de drenagem (direita).

Ambas as cartas foram re-classificados em categorias escolhidas mediante a observação das quebras do histograma de frequências, buscando coerência com as condições do campo na escala de trabalho da pesquisa. A rugosidade foi mapeada em cinco classes (Plano,

58.42%; ondulado, 28.31%; levemente rugoso, 9.17%; rugoso, 7.30%; muito rugoso, 3.81%) e a densidade de drenagem em quatro (Nula, 42.62%; baixa, 35.56%; média, 10.05%; alta, 11.78%). As Figura 9.7 a Figura 9.10 ilustram os detalhes de cada classificação, e os mapas de rugosidade e densidade de drenagem re-classificados.

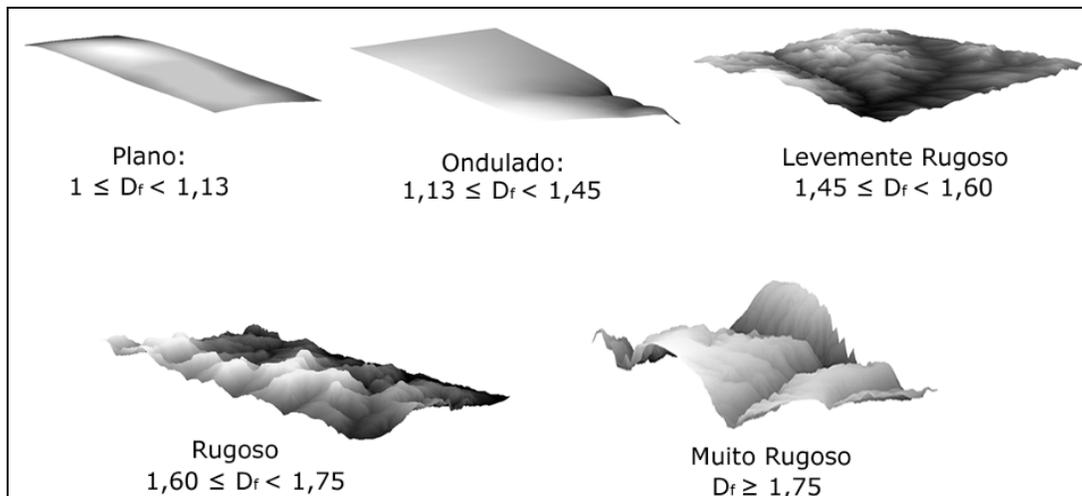


Figura 9.7. Re-classificação da rugosidade.

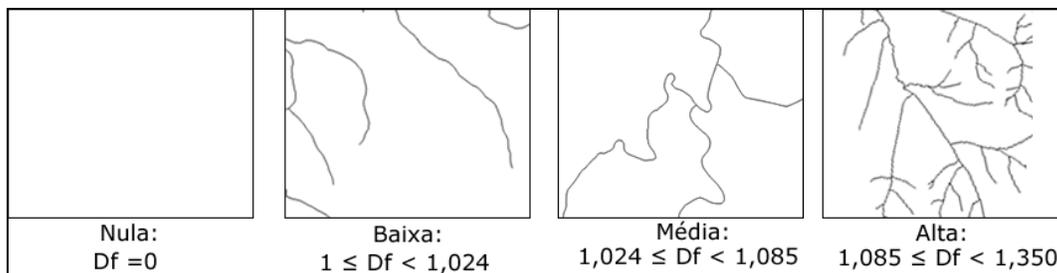


Figura 9.8. Re-classificação da densidade de drenagem.

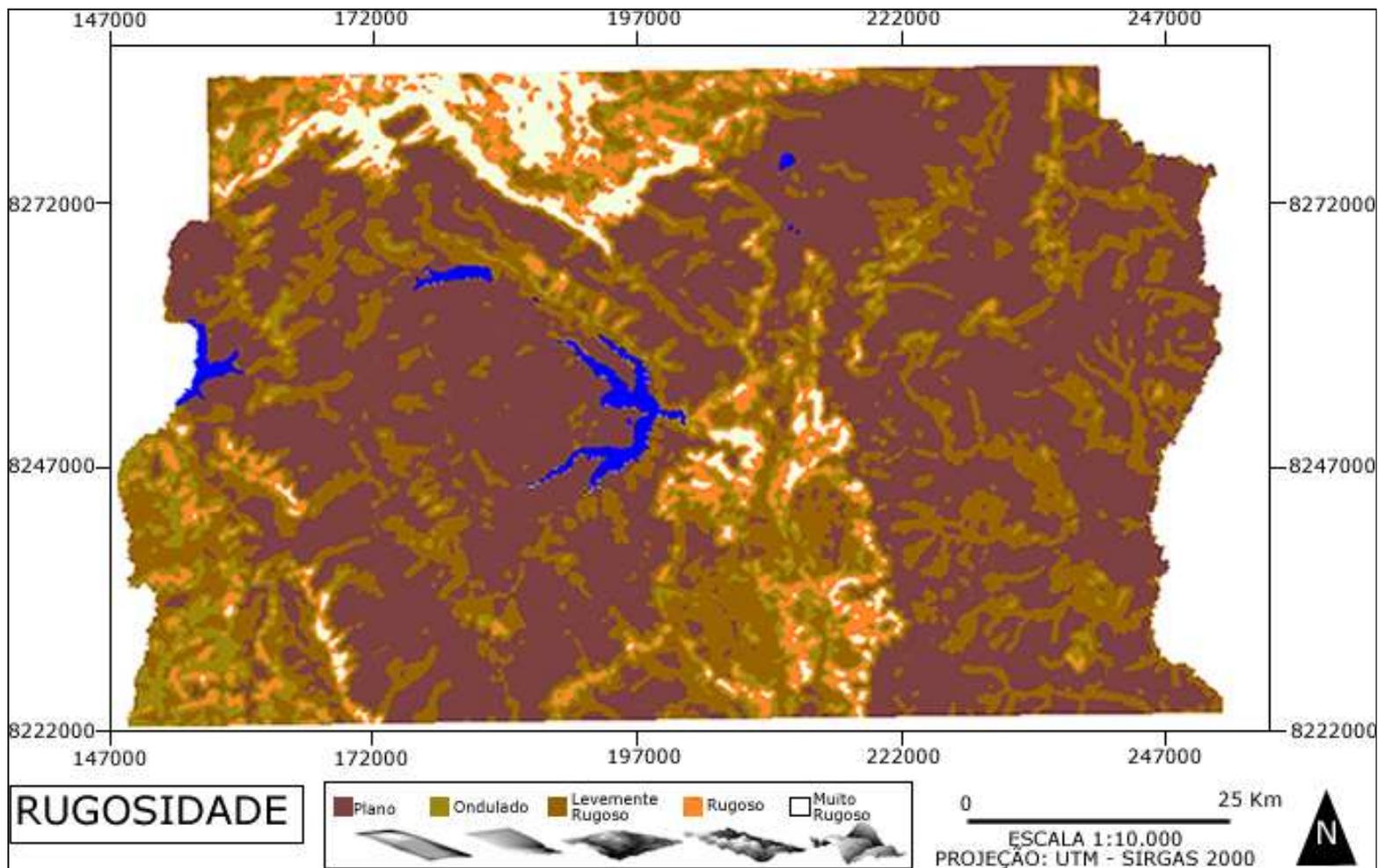


Figura 9.9. Carta de rugosidade do terreno do DF.

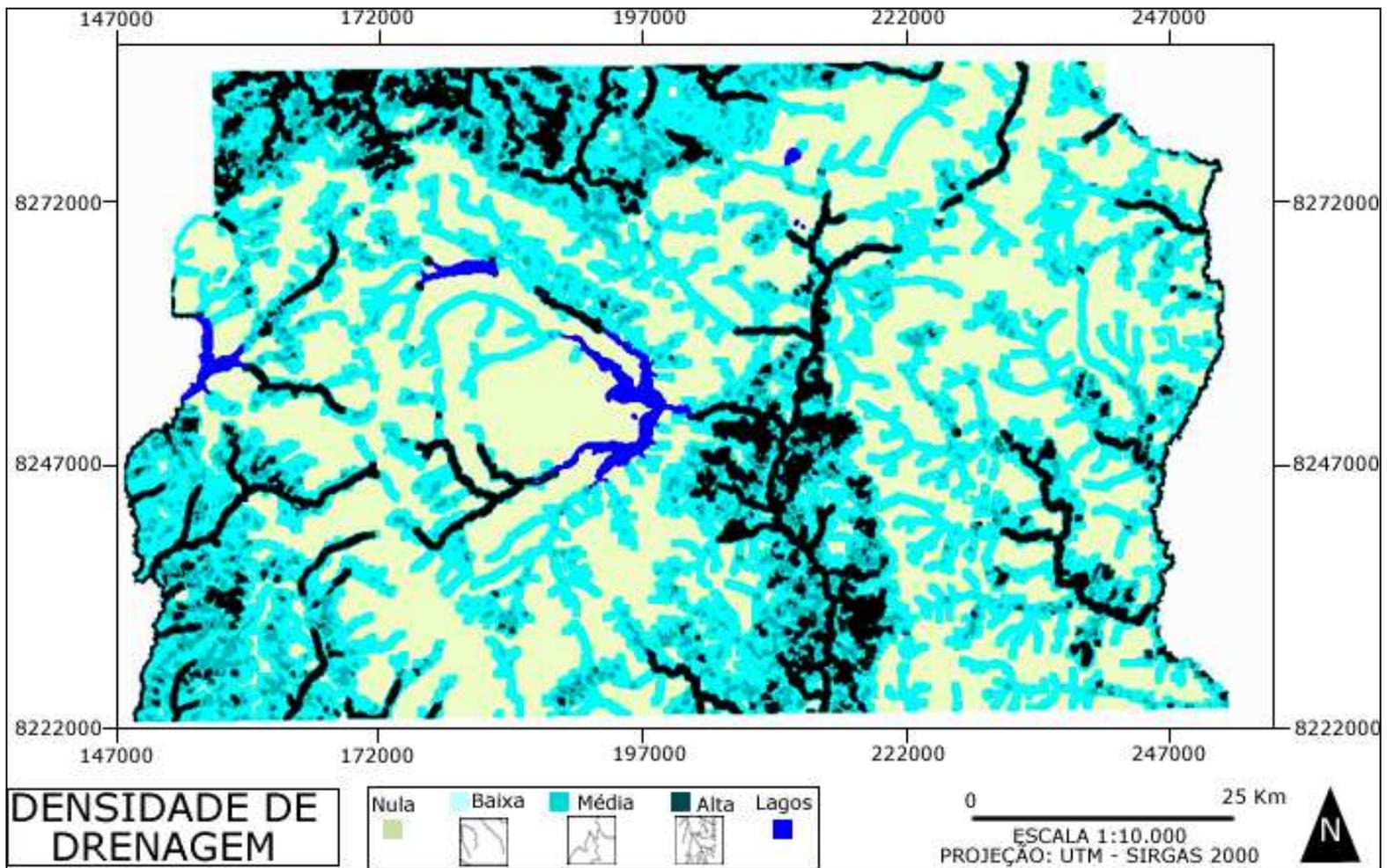


Figura 9.10. Carta de densidade de drenagem do DF.

A carta de rugosidade foi comparada com outras cartas de rugosidade programadas no Spring® (Anexo 2) com base nos parâmetros do desvio padrão da declividade (σ_{decl}), desvio padrão da altura (σ_{alt}), lacunaridade da declividade (λ_{decl}) e lacunaridade da altura (λ_{alt}), conforme às informações apresentadas nos itens 4.6, 5.4.2 e 5.4.4.; a Figura 9.11 mostra uma comparação visual dos resultados:

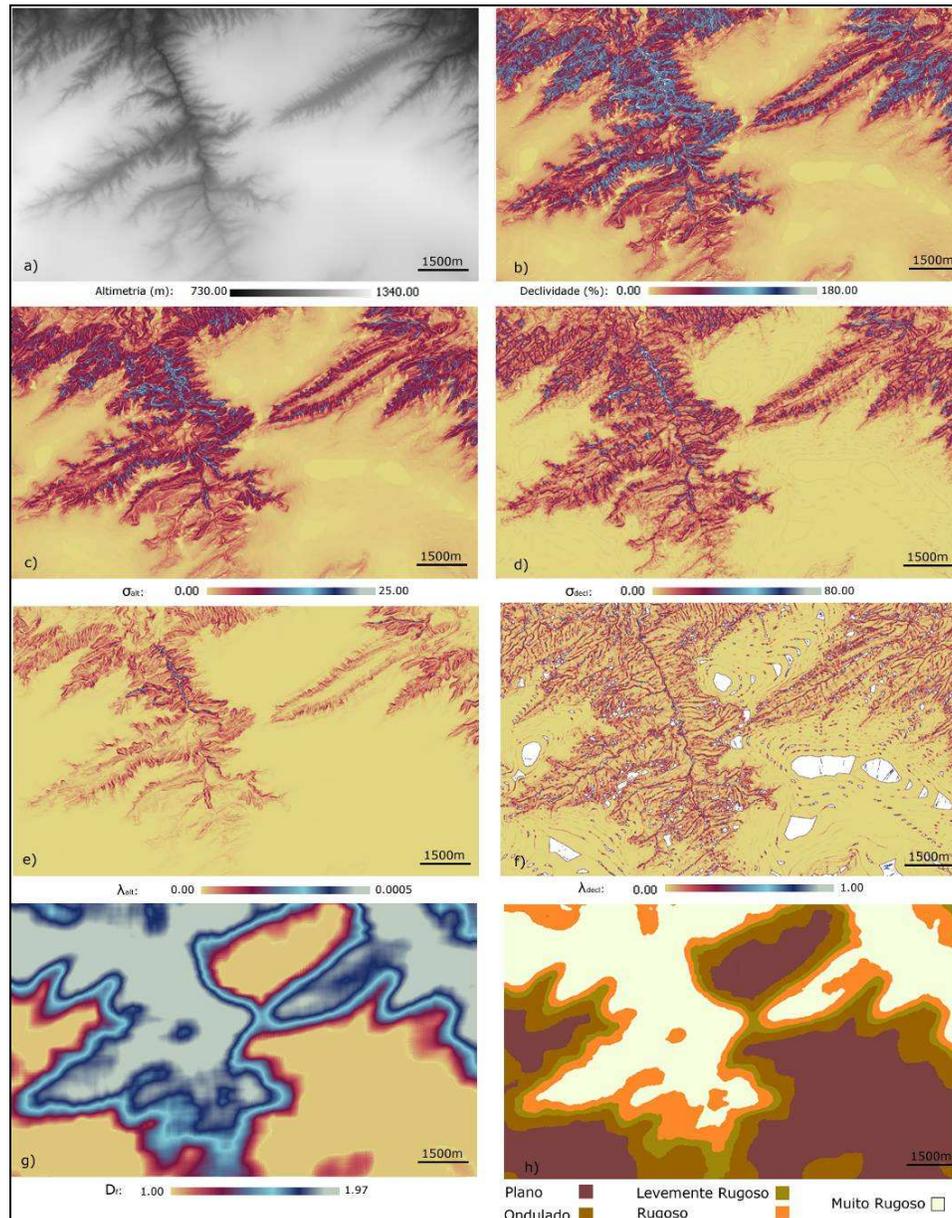


Figura 9.11. Comparação de resultados usando diversos estimadores da rugosidade: a) Altimetria; b) Declividade; c) Desvio padrão da altura (σ_{alt}); d) Desvio padrão da declividade (σ_{decl}); e) Lacunaridade da altura (λ_{alt}); f) Lacunaridade da declividade (λ_{decl}); g) Dimensão fractal de curvas de nível (D_f); h) Re-classificação de D_f .

Os resultados exibidos na Figura 9.11 permitem inferir que σ_{decl} , σ_{alt} , λ_{decl} , e λ_{alt} foram sensíveis às variações sutis do relevo (devido em grande medida ao tamanho de 7x7 pixels usado na configuração da janela móvel), porém não oferecem destaques relevantes ao que é fornecido pela carta de declividade e a carta de altimetria; aliás, os resultados obtidos mediante estes parâmetros são muito parecidos com o mapa de declividade. O tamanho da janela móvel foi escolhido em função da magnitude e tempos de computação adequados às capacidades de processamento disponíveis, mediante testes em “arquivos piloto”; o ideal seria ter usado janelas móveis do mesmo tamanho programado na análise fractal, isso explica o aspecto de menor sensibilidade para a dimensão fractal.

Os resultados obtidos com o índice de lacunaridade (tanto na declividade como na altimetria) não foram convincentes; na Figura 9.11e se percebe a perda do detalhe com relação aos resultados dos outros parâmetros, na Figura 9.11f são visíveis os vazios nas planícies horizontais.

A dimensão fractal das curvas de nível ofereceu resultados menos sensíveis às variações sutis do terreno, com relação aos outros parâmetros; isto devido ao grande tamanho da janela móvel (128x128 pixels). Em contraste ao anterior, a rugosidade é apresentada de maneira regionalizada e não local, permitindo inferir zonas para cada tipo de rugosidade.

9.5 VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA

Dezessete subconjuntos de dados foram amostrados (Figura 9.12); o tamanho das amostras foi limitado em função da área sem intervenção antrópica.. Catorze desses subconjuntos (roxos) foram situados sobre um tipo de solo específico; os outros três (amarelos) foram selecionadas tentando atingir a maior quantidade de solos possíveis.

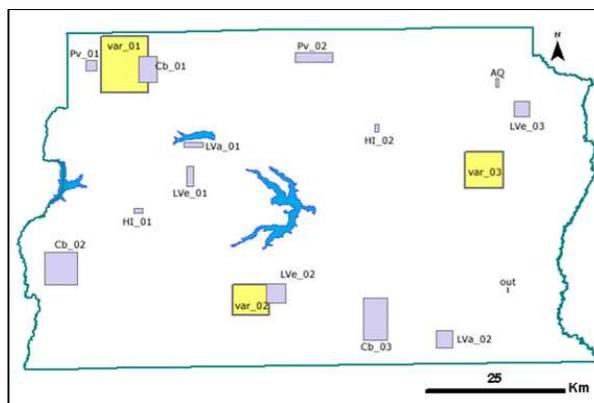


Figura 9.12. Amostragem de dados para a validação estatística

9.5.1 SUBCONJUNTOS AMARELOS

O conjunto Var_01 abrangeu solos do tipo PV, LVe, LVa, Cb, e Outros; o conjunto Var_02 se superpôs com solos do tipo LVa, LVe, HI e Cb; e o conjunto Var_03, com solos do tipo AQ, Cb, HI, LVa e LVe. Estes três conjuntos foram processados estatisticamente no Spring® mediante matrizes de correlação entre os tipos de solo, geomorfologia, densidade de drenagem, rugosidade estimada mediante a D_f e rugosidade estimada mediante os parâmetros σ_{decb} , σ_{alt} , λ_{decb} e λ_{alt} (Tabelas 9.2 a 9.5)

Vale lembrar que duas variáveis estão correlacionadas quando os valores de uma delas muda sistematicamente com respeito aos valores homônimos da outra e vice-versa. O coeficiente r é interpretado da seguinte maneira (Camara *et al*, 1996):

- Se $0 < r < 1$, existe uma dependência entre as duas variáveis, ou seja, quando uma delas aumenta, a outra também o faz; quanto mais perto de 1, maior será a interdependência;
- Se $r = 0$, não existe relação linear. Isto não implica que as variáveis sejam independentes, ainda podem existir relações não-lineares entre as variáveis;
- Se $-1 < r < 0$, existe uma correlação negativa, ou seja, quando uma delas aumenta, a outra diminui;

Todas as variáveis correlacionadas foram consideradas variáveis contínuas, com exceção do tipo de solo e da geomorfologia; estas duas últimas foram consideradas variáveis semânticas, pois não se dispôs de parâmetros quantitativos espacializados para representá-las. Para dar maior visibilidade aos resultados e facilitar a interpretação, as células foram coloridas de acordo com o grau de correlação, em cores azul ($|r| \geq 0,7$), verde ($0,5 \leq |r| < 0,7$), amarelo ($0,3 \leq |r| < 0,5$) e sem realce ($|r| \leq 0,3$).

Tabela 9.2. Matriz de Correlação na amostra Var_01. σ_{alt} = Desvio padrão da altura; σ_{decl} = Desvio padrão da declividade; λ_{alt} = Lacunaridade da altura; λ_{decl} =Lacunaridade da declividade.

		0	1	2	3	4	5	6	7
Densidade de Drenagem (D_f)	0	1							
σ_{alt}	1	0,52	1						
σ_{decl}	2	0,51	0,73	1					
λ_{alt}	3	0,35	0,92	0,64	1				
λ_{decl}	4	0,00	-0,11	-0,03	-0,06	1			
Rugosidade (D_f)	5	0,82	0,65	0,60	0,47	-0,03	1		
Solo	6	0,72	0,40	0,39	0,26	0,00	0,69	1	
Geomorfologia	7	-0,67	-0,69	-0,64	-0,51	0,02	-0,76	-0,54	1

Tabela 9.3. Matriz de Correlação na amostra Var_02. σ_{alt} = Desvio padrão da altura; σ_{decl} = Desvio padrão da declividade; λ_{alt} = Lacunaridade da altura; λ_{decl} =Lacunaridade da declividade.

		0	1	2	3	4	5	6	7
Densidade de Drenagem (D_f)	0	1							
σ_{alt}	1	0,33	1						
σ_{decl}	2	0,33	0,78	1					
λ_{alt}	3	0,24	0,91	0,70	1				
λ_{decl}	4	0,09	-0,08	0,01	-0,02	1			
Rugosidade (D_f)	5	0,43	0,45	0,38	0,30	0,03	1		
Solo	6	0,30	0,39	0,31	0,27	0,02	0,38	1	
Geomorfologia	7	-0,22	-0,48	-0,35	-0,29	0,04	-0,46	-0,39	1

Tabela 9.4. Matriz de Correlação na amostra Var_03. σ_{alt} = Desvio padrão da altura; σ_{decl} = Desvio padrão da declividade; λ_{alt} = Lacunaridade da altura; λ_{decl} =Lacunaridade da declividade.

		0	1	2	3	4	5	6	7
Densidade de Drenagem (D_f)	0	1							
σ_{alt}	1	0,44	1						
σ_{decl}	2	0,35	0,58	1					
λ_{alt}	3	0,32	0,88	0,62	1				
λ_{decl}	4	0,06	-0,18	0,00	-0,06	1			
Rugosidade (D_f)	5	0,40	0,34	0,26	0,25	0,03	1		
Solo	6	0,45	0,23	0,21	0,18	0,07	0,25	1	
Geomorfologia	7	0,61	0,46	0,29	0,30	0,03	0,44	0,52	1

Tabela 9.5. Matriz média dos módulos de r para as três amostras. σ_{alt} = Desvio padrão da altura; σ_{decl} = Desvio padrão da declividade; λ_{alt} = Lacunaridade da altura; λ_{decl} =Lacunaridade da declividade.

		0	1	2	3	4	5	6	7
Densidade de Drenagem (D_f)	0	1							
σ_{alt}	1	0,43	1						
σ_{decl}	2	0,40	0,70	1					
λ_{alt}	3	0,30	0,90	0,65	1				
λ_{decl}	4	0,05	0,12	0,01	0,05	1			
Rugosidade (D_r)	5	0,55	0,48	0,41	0,34	0,03	1		
Solo	6	0,49	0,34	0,30	0,24	0,03	0,44	1	
Geomorfologia	7	0,50	0,54	0,43	0,37	0,03	0,55	0,48	1

A densidade de drenagem se destacou como a variável com maior ligação à ocorrência de tipos de solos e ambientes geomorfológicos. Ao respeito dos parâmetros de rugosidade, a D_f e σ_{alt} demonstraram a maior correlação com os solos e a geomorfologia. O parâmetro λ_{decl} se destacou como aquele que apresentou a menor correlação com os dados litológicos.

A correlação entre a densidade de drenagem e a rugosidade mostra que há uma interdependência entre ambos os parâmetros, esta se manteve variando entre 0,40 e 0,82.

9.5.2 SUBCONJUNTOS ROXOS

Os subconjuntos Cb_01, Cb_02, Cb_03, LVa_01, LVa_02, LVe_01, LVe_02, LVe_03, AQ, Out, HI_01, HI_02, PV_01 e PV_02 abrangeram unicamente um tipo de solo; estes foram analisados individualmente no Spring® mediante tabulação cruzada com os parâmetros fractais (densidade de drenagem e rugosidade). Os resultados são sintetizados nas Tabelas 9.6 e 9.7

Tabela 9.6. Tabulação cruzada entre a rugosidade e o tipo de solo. Azul ($\geq 50\%$), verde ($\geq 30\%$), amarelo ($\geq 20\%$).

Solo	Rugosidade					%
	Plano	Ondulado	Leve	Rugoso	Muito Rugoso	
LVe	96,51	3,49	0,00	0,00	0,00	100%
LVa	99,89	0,11	0,00	0,00	0,00	100%
Cb	0,90	23,79	25,73	24,61	24,97	100%
AQ	59,88	32,01	8,11	0,00	0,00	100%
HI	81,14	13,52	4,69	0,65	0,00	100%
PV	0,21	11,13	46,03	41,79	0,85	100%
Outros	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100%

Tabela 9.7. Tabulação cruzada entre a densidade de drenagem e o tipo de solo. Azul ($\geq 50\%$), verde ($\geq 30\%$), amarelo ($\geq 20\%$).

Solo	Densidade de drenagem				
	Nula	Baixa	Media	Alta	%
LVe	90,75	9,25	0,00	0,00	100%
Lva	92,51	7,49	0,00	0,00	100%
Cb	0,54	26,32	32,31	40,84	100%
AQ	98,79	1,21	0,00	0,00	100%
HI	21,69	33,97	19,34	24,99	100%
PV	1,29	80,52	11,78	6,42	100%
Outros	0,00	0,00	0,00	100,00	100%

Com base nos resultados das Tabelas 9.6 e 9.7, propõe-se estabelecer uma relação qualitativa entre a permeabilidade dos solos do DF (Equação 9.1), onde $K[i]$ representa o potencial de infiltração do tipo de solo “i”:

$$(K[AQ] \geq K[LVe] \geq K[LVa]) > K[HI] > (K[PV] \geq K[Cb]) > K[Outros] \quad (9.1)$$

Esta relação parte dos fundamentos coletados na revisão bibliográfica, os quais já foram citados nos capítulos anteriores e são sintetizados a seguir:

- Quanto maior é a densidade de drenagem, menor será a capacidade de retenção da água e a permeabilidade do substrato, pois densidades maiores significam menor potencial de infiltração e vice-versa;
- Tem-se menor densidade de drenagem sobre rochas mais solúveis, pois se desenvolve escoamento em sub-superfície;
- A permeabilidade é inversamente proporcional à rugosidade, pois densidades maiores significam menor potencial de infiltração e vice-versa;

Como era de se esperar, os latossolos (vermelho e amarelo) demonstraram tendência de ocorrer em relevos com configuração plana e com poucas linhas de drenagens na escala de observação da pesquisa; sendo estes os tipos de solos mais permeáveis da região. A princípio, a Equação 9.1 só teria validade em escalas 1:10.000, facilitando visualizar uma noção sub-regional do contraste entre a capacidade de escoamento, potencial de infiltração ou retenção de água entre vários tipos de solo.

9.6 INFERÊNCIA DE DADOS

Dadas as relações conhecidas entre a permeabilidade regional dos solos com a rugosidade e a densidade de drenagem, explorou-se a possibilidade de inferir cartas do potencial infiltração com base nas cartas estimadas a partir da dimensão fractal (Figura 9.9 e Figura 9.10). A inferência foi realizada de duas formas diferentes: i) tabulação cruzada (Figura 9.13); e ii) fórmula analítica (Figura 9.14). A seguir serão mostrados os resultados.

9.6.1 INFERÊNCIA BOOLEANA

As cartas obtidas de rugosidade e densidade de drenagem baseadas na dimensão fractal foram comparadas no programa Spring® mediante tabulação cruzada; a partir desta informação, da percepção da zona de estudo e das informações hidrogeológicas disponíveis (item 7.6.2.1), foram mapeadas quatro classes do potencial de infiltração dos solos do DF (Tabela 9.8).

Tabela 9.8. Tabulação cruzada entre a densidade de drenagem e a rugosidade; e separação por classes segundo o potencial de infiltração

		Densidade de Drenagem				%
		Nula	Baixa	Média	Alta	
Rugosidade	Plano	38,90	11,13	0,29	1,11	51,43
	Ondulado	3,44	17,25	3,35	4,26	28,30
	Levemente Rugoso	0,24	4,19	2,85	1,89	9,17
	Rugoso	0,03	2,25	2,38	2,64	7,30
	Muito Rugoso	0,00	0,74	1,18	1,88	3,81
%		42,62	35,56	10,05	11,78	100,00

Cor	Potencial de infiltração	Velocidade média	%
	Muito baixo	$< 10^{-8}$ m/s	14,97%
	Baixo	10^{-7} a 10^{-8} m/s	14,31%
	Médio	10^{-6} a 10^{-7} m/s	31,82%
	Alto	10^{-5} a 10^{-6} m/s	38,90%

A carta estimada do potencial de infiltração é apresentada na Figura 9.13, a avaliação estatística do produto foi feita mediante tabulação cruzada entre este e as cartas de solos (Figura 7.13) e domínio poroso hidrogeológico (Figura 7.24); os resultados são apresentados nas Tabelas 9.9 e 9.10

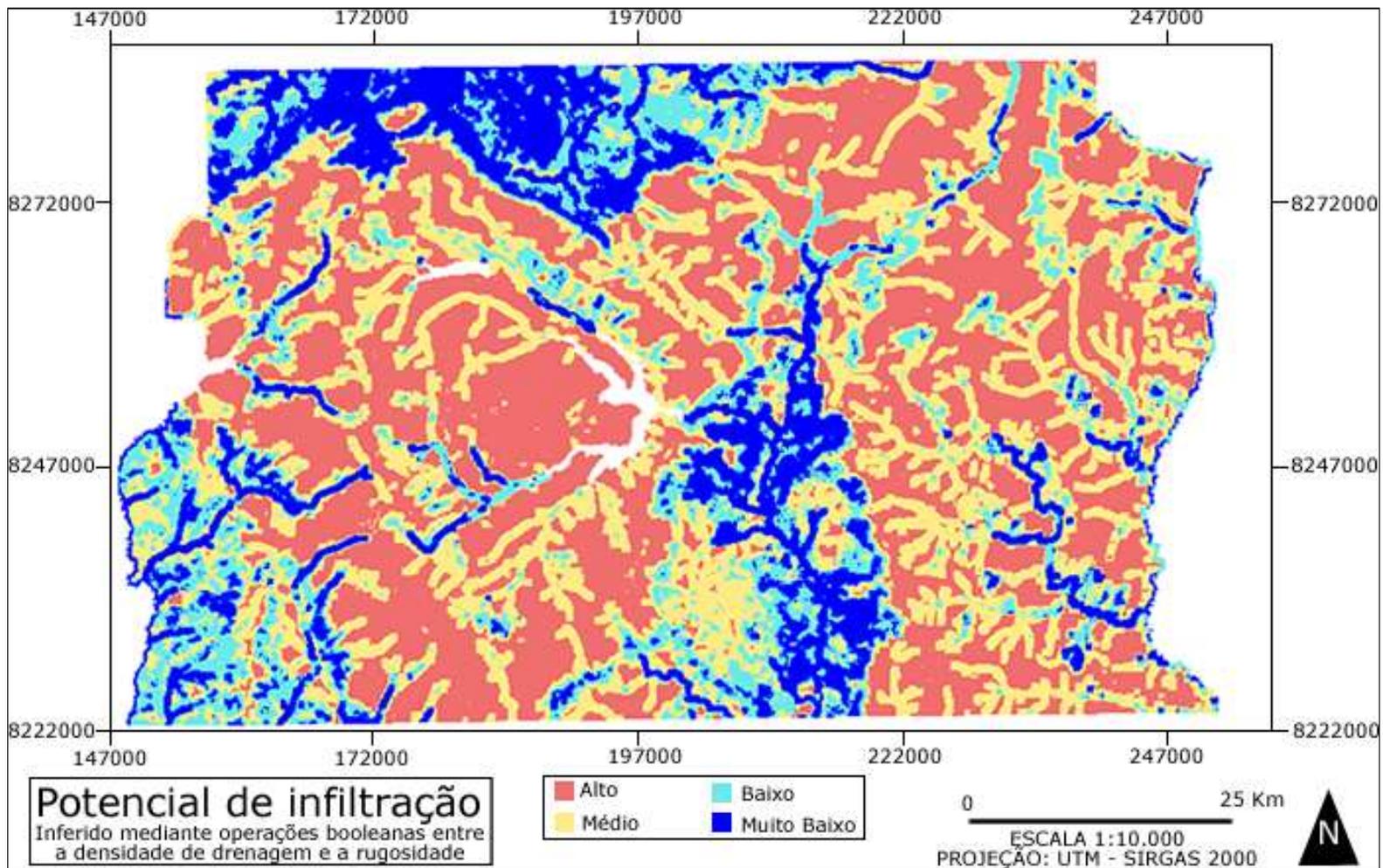


Figura 9.13. Carta do potencial de infiltração estimada mediante tabulação cruzada

Tabela 9.9. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e os tipos de solos. Azul ($\geq 50\%$), verde ($\geq 30\%$), amarelo ($\geq 20\%$).

		Solos						
		Lve	AQ	LVa	HI	Cb	PV	Outros
Potencial de Infiltração	Alto	65,94	61,24	45,08	18,40	6,01	1,33	0,04
	Medio	28,27	30,18	42,48	60,29	29,65	21,11	9,01
	Baixo	3,71	7,74	7,91	13,34	28,95	38,41	32,14
	Muito Baixo	2,09	0,84	4,53	7,97	35,39	39,16	58,82
		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 9.10. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e o domínio poroso da hidrogeologia. Azul ($\geq 50\%$), verde ($\geq 30\%$), amarelo ($\geq 20\%$).

		Hidrogeologia (Domínio Poroso)			
		P1	P2	P3	P4
Potencial de Infiltração	Alto	58,02	51,68	38,95	5,91
	Medio	31,69	36,29	35,86	23,74
	Baixo	7,07	6,85	14,52	29,48
	Muito Baixo	3,22	5,19	10,68	40,88
		100%	100%	100%	100%

A relação entre o potencial de infiltração estimado e os tipos de solos (Tabela 9.9) apresenta coerência com a Equação 9.1. Os resultados da Tabela 9.10 são bons, mais ainda podem ser melhorados, pois segundo as informações do item 7.6.2.1, a relação do potencial de infiltração do domínio poroso é tal que $P1 > P2 > P3 > P4$ e a Tabela 9.10 mostra muita semelhança entre os resultados de P1 e P2; atribui-se isto ao fato de que o mapa hidrogeológico foi elaborado numa escala 1:100.000, ou seja, numa resolução 10 vezes mais grossa que a escala deste trabalho, além disto, os valores de infiltração do inventário hidrogeológico são valores médios, sendo conhecido o fato da alta variabilidade espacial deste parâmetro.

9.6.2 INFERÊNCIA MEDIANTE FÓRMULA ANALÍTICA

Abstraiu-se o potencial de infiltração como função da densidade de drenagem e da rugosidade, de acordo com a Equação 9.2, onde x é o expoente do coeficiente de infiltração, baseado nos valores da Tabela 7.2 ($10^{-5} < 10^{-x} < 10^{-10}$, ou seja, $5 < x < 10$), a e b são coeficientes de ajuste regional ($a=1.89$, $b = 5$; Equações 9.3 e 9.4), D é a densidade de drenagem (min= 0; max = 1,35) e Rug é a rugosidade (min = 1; max = 1,96); os valores máximos e mínimos da rugosidade e da densidade de drenagem foram extraídos dos

respectivos histogramas de frequências (Figura 9.6), estes valores foram a base para calcular os coeficientes de ajuste regional (Equações 9.3 e 9.4)

$$x = a.D.Rug + b \quad (9.2)$$

$$se \ x = 5 \rightarrow D, Rug = \min \rightarrow 5 = a(0)(1) + b \rightarrow b = 5 \quad (9.3)$$

$$se \ x = 10 \rightarrow D, Rug = \max \rightarrow 10 = a(1.35)(1.96) + 5 \rightarrow a = 1.89 \quad (9.4)$$

A carta estimada do potencial de infiltração é apresentada na Figura 9.14, o mapeamento de classes foi feito conforme às velocidades médias de infiltração apresentadas na Tabela 9.8 e a avaliação estatística do produto foi feita mediante tabulação cruzada entre este e as cartas de solos (Figura 7.13) e domínio poroso hidrogeológico (Figura 7.24). Os resultados apresentados na Tabela 9.11 mostram coerência com a Equação 9.1. A Tabela 9.12 mostra muita semelhança entre os valores das unidades P1, P2 e P3, de maneira que estes resultados não concordam plenamente com os valores propostos no item 7.6.2.1. Há que levar em consideração que o mapa hidrogeológico além de ter uma escala de representação menor, adota valores médios da infiltração, o qual é um parâmetro de muita variabilidade espacial.

Tabela 9.11. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e os tipos de solos. Azul ($\geq 50\%$), verde ($\geq 30\%$), amarelo ($\geq 20\%$).

		Solos						
		AQ	LV	LVa	HI	Cb	PV	Outros
Potencial de Infiltração	Alto	84,34	77,67	63,75	32,84	17,90	8,89	5,35
	Medio	8,66	13,81	20,35	36,55	15,18	17,19	8,71
	Baixa	6,53	8,19	14,67	29,81	40,14	43,84	55,88
	Muito Baixa	0,46	0,33	1,23	0,80	26,78	30,08	30,05
		100	100	100	100	100	100	100

Tabela 9.12. Tabulação cruzada entre o potencial de infiltração e o domínio poroso da hidrogeologia. Azul ($\geq 50\%$), verde ($\geq 30\%$), amarelo ($\geq 20\%$).

		Domínio Poroso			
		P1	P2	P3	P4
Potencial de Infiltração	Alto	71,38	65,28	53,17	16,32
	Medio	15,07	18,47	18,23	13,45
	Baixa	12,39	13,60	22,41	38,95
	Muito Baixa	1,16	2,65	6,19	31,28
		100	100	100	100

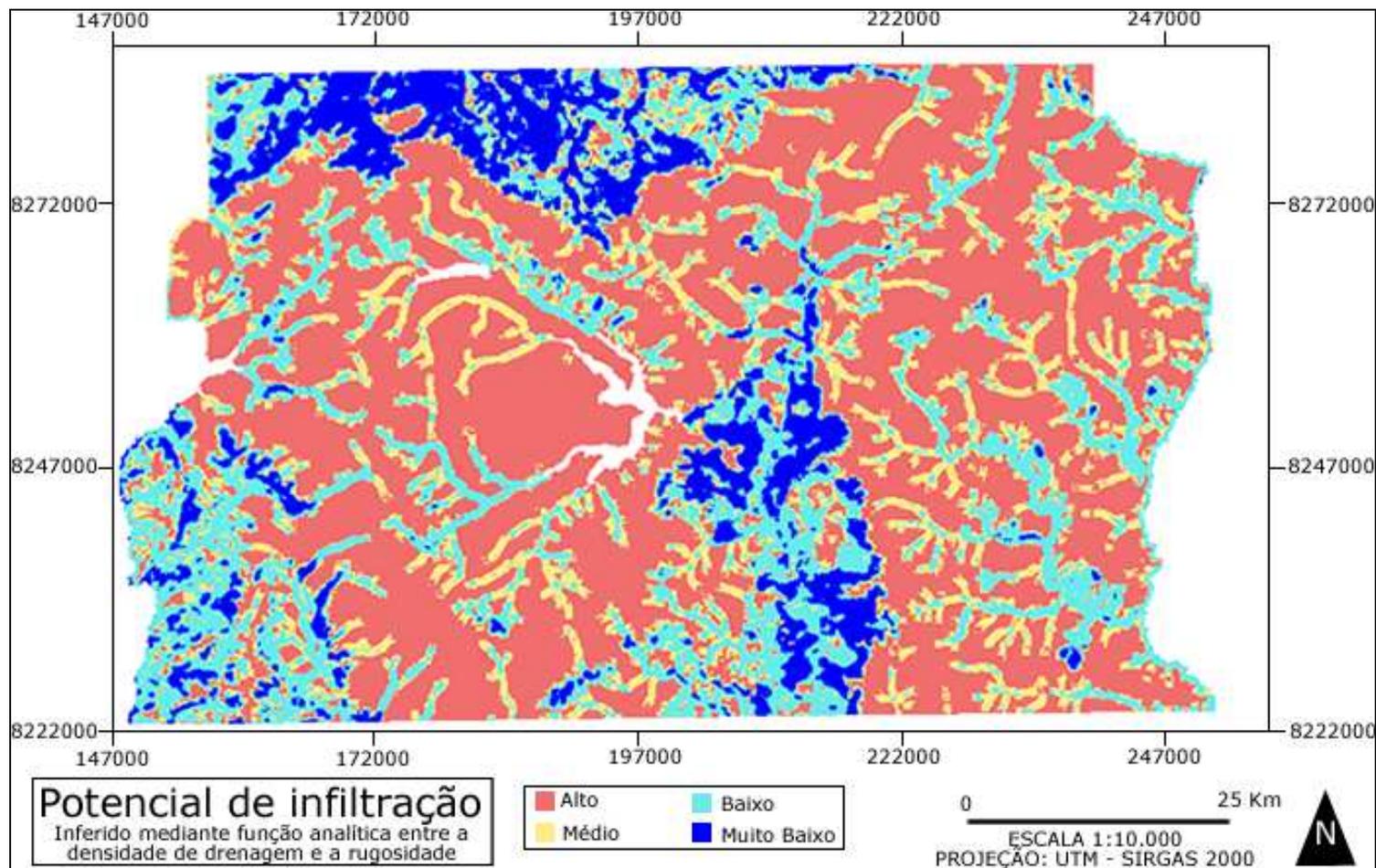


Figura 9.14. Carta do potencial de infiltração estimada mediante fórmula analítica.

9.7 MODELAGEM DE TERRENOS FRACTAIS

Os potenciais práticos da geração de fractais estão claramente associados à melhoria de mapas topográficos e hidrográficos, também à criação de modelos realistas em 3D de zonas de projetos, processos erosivos, fraturas em pavimentos, entre outros casos típicos da geotecnia. De acordo com os conceitos apresentados no item 5.4.6 extraiu-se uma região aleatória de aproximadamente 10Ha (64x64 pixels), cuja dimensão fractal estimada pelo método da cobertura projetiva (item 4.4.4) resultou em $D_F = 2.26$; conseqüentemente, o coeficiente de Hurst (item 4.4.3), parâmetro usado na modelagem de terrenos (Anexos 3 e 4), foi estimado como $H=3-D_F = 0.74$, segundo a Equação 4.5

Usando o método DPM (item 5.4.6), melhorou-se a resolução da superfície aproximadamente 16 vezes, ampliando-a de 5m a 0.32m por pixel, o qual resultou num arranjo de 1009x1009 pixels. Não é necessário aumentar o detalhe de um objeto na ordem de 16 vezes (como foi feito aqui para fins ilustrativos), o grau de melhoria na resolução será em função das necessidades do projeto; cabe ressaltar que o grau de aumento na resolução deve respeitar o domínio de conservação das propriedades fractais do objeto de modelagem, de acordo com os conceitos apresentados na teoria dos multifractais (item 4.5).

O algoritmo foi programado no Matlab® (Anexos 3 e 4); a Figura 9.15 compara a superfície original (esquerda) com a superfície gerada mediante interpolação fractal (direita); as células da grade na superfície original ficam invisíveis na superfície interpolada.

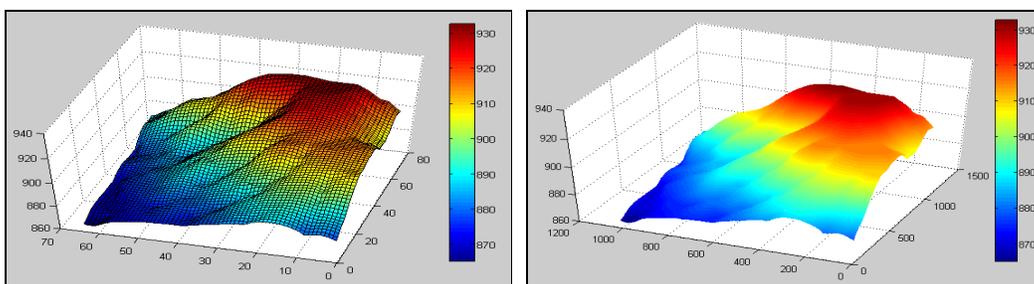


Figura 9.15. Superfície original de 64x64 pixels (superior) e superfície de 1009x1009 pixels simulada mediante o algoritmo de interpolação fractal do DPM (inferior).

A mesma simulação foi feita mediante um algoritmo de interpolação bi-linear (Camara *et al*, 1996), o qual está disponível nas ferramentas de modelagem do programa Spring®. Nos três casos (superfície original, simulação bi-linear e simulação fractal) comparou-se o

modelo digital de elevação, o histograma de frequências da altimetria, o diagrama de isolinhas das superfícies e um perfil aleatório (Figura 9.16).

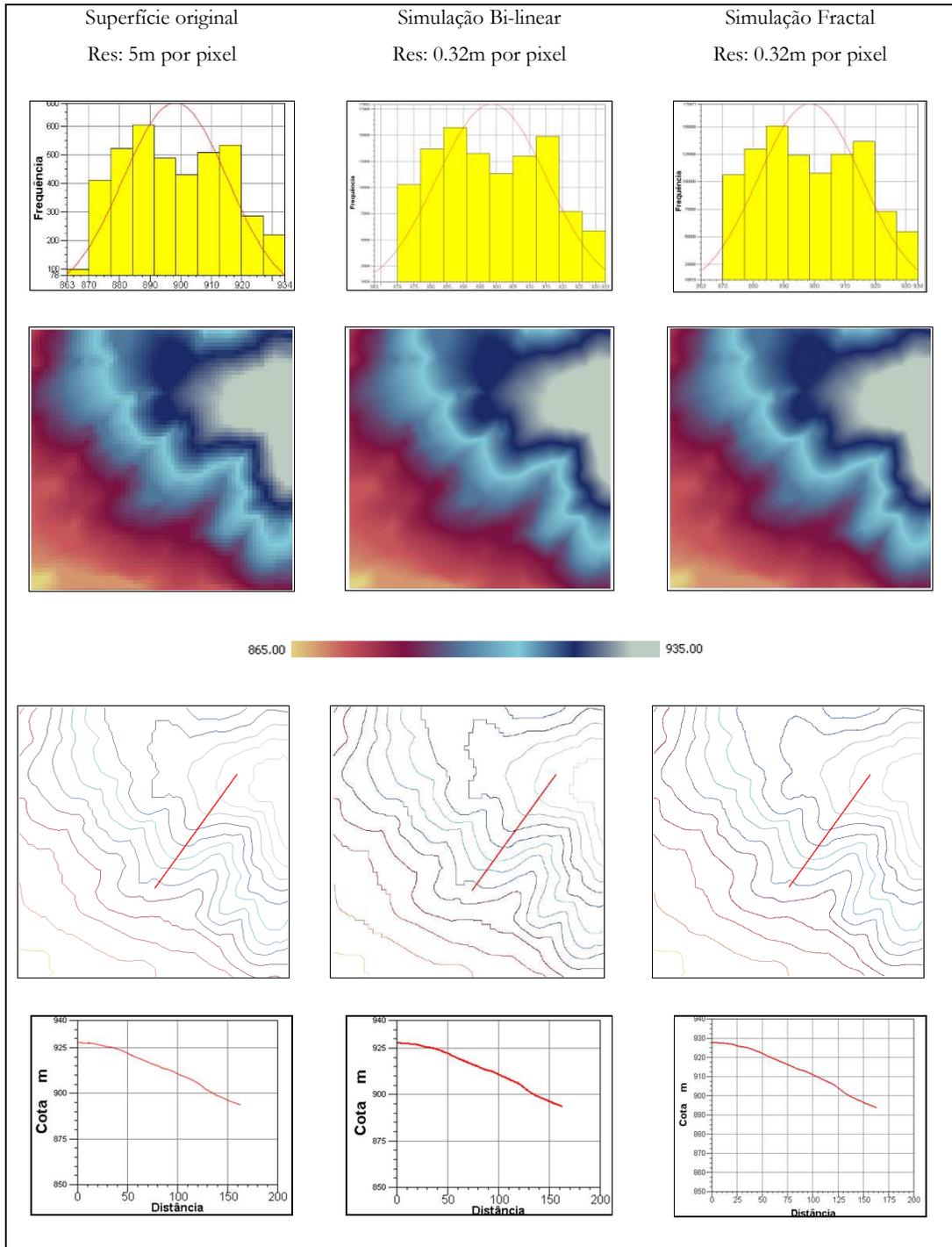


Figura 9.16. Histograma de frequências da altura, modelo de elevação digital, isolinhas e perfil topográfico do modelo original (esquerda), simulação feita no Spring® mediante interpolador bi-linear (centro) e simulação mediante interpolação fractal (direita).

Claramente observa-se que ambos os algoritmos melhoram a aparência da superfície, conservando a distribuição estatística das alturas; porém, os contornos topográficos (isolinhas) ficaram mais bem definidos com a modelagem feita mediante o algoritmo de interpolação fractal, comprovando a qualidade desta técnica.

Com estas informações criou-se a rede de drenagem da superfície original e da superfície fractal usando o aplicativo hidrológico disponível no Spring®; a comparação dos resultados obtidos é feita na Figura 9.17

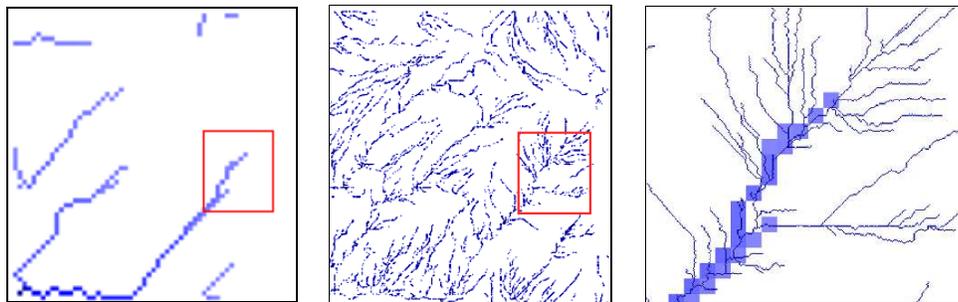


Figura 9.17. Redes de drenagem geradas no Spring®. Esquerda: proveniente da superfície de 5m de resolução; centro: proveniente da superfície simulada mediante fractais, com 0.32m de resolução; direita: comparação em detalhe de ambas as redes (quadro vermelho).

A aparência do padrão de drenagem da superfície original (Figura 9.17, esquerda) exibe um padrão em treliça; os resultados gerados mediante a superfície fractal (Figura 9.17, centro) mostram como esse padrão em treliça é desdoblado num padrão dendrítico na medida em que é melhorado o nível de detalhe.

As metodologias comercialmente usadas na interpolação de superfícies e melhoria da resolução de imagens também são eficazes e não se desprezam, embora existam outras que oferecem resultados de melhor qualidade (como aquela que foi apresentada neste trabalho). Acredita-se que a tendência dos pacotes de SIG será incorporar este tipo de técnicas dentro das ferramentas operativas, as quais por sua vez serão substituídas mais na frente por outras que ainda não estejam concebidas no marco da ciência.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

10.1 CONCLUSÕES

A geometria do relevo do DF satisfaz os postulados da geometria fractal: Complexidade, auto-similaridade e invariância num domínio limitado de escalas. Além disto, possui caráter multifractal, ou seja, se compõe de um conjunto heterogêneo de fractais, que por sua vez, se compõem de subconjuntos heterogêneos de menor tamanho, e assim por diante até um nível de resolução indeterminado.

As componentes do sistema topográfico do DF, na escala 1:10.000 conformam uma estrutura hierárquica concatenada em três níveis de resolução horizontal. O primeiro nível abrange um domínio entre os 5 e 100m; o segundo nível contém unidades de terreno numa cobertura entre os 100 e 800m; no terceiro e maior nível, as componentes do terreno compreendem tamanhos aproximados entre os 800m e 10km de extensão. Cada um destes níveis pode ser estudado como um conjunto “mono-fractal” separadamente.

Os níveis hierárquicos do relevo do DF continuam desdobrando-se em níveis de resolução que não foram abrangidas por esta análise, tanto na micro-escala como na macro-escala.

Propõe-se que as análises geomorfológicas e geomorfométricas no planalto central do Brasil considerem os domínios de escalas espaciais propostos neste trabalho.

Propôs-se um estimador da densidade de drenagem baseado na dimensão fractal dos traços dos canais hidrográficos lineares. Esta se destacou como a variável com maior ligação à ocorrência de tipos de solos e ambientes geomorfológicos. E também demonstrou interdependência direta com a rugosidade do terreno.

Propôs-se um estimador da rugosidade do terreno baseado na dimensão fractal da projeção horizontal das curvas de nível. Este estimador foi comparado de forma qualitativa e quantitativa com outros quatro estimadores da rugosidade: desvio padrão da declividade (σ_{decl}), desvio padrão da altura (σ_{alt}), lacunaridade da altura (λ_{alt}) e lacunaridade da declividade (λ_{decl}). Os estimadores baseados na dimensão fractal e no desvio padrão da altura demonstraram serem os mais satisfatórios ao apresentar maior dependência com a

ocorrência de tipos de solos e ambientes geomorfológicos. O estimador λ_{decl} destacou-se como aquele que apresentou a menor correlação com os dados do substrato.

Com base nos conceitos da dimensão fractal e dos algoritmos geomorfométricos, elaborou-se uma carta da densidade de drenagem (Figura 9.10) e uma carta da rugosidade do terreno (Figura 9.9), ambas para o DF numa escala 1:10.000.

Foi estabelecida uma relação qualitativa entre a permeabilidade dos solos do DF, com validade na escala de trabalho (Equação 9.1). Esta relação facilitará uma noção regional do contraste entre a capacidade de escoamento, potencial de infiltração ou retenção de água entre vários tipos de solo na região.

Usando os princípios do mapeamento digital de solos, foi inferida uma carta do potencial de infiltração do DF na escala 1:10.000. Esta carta foi estimada mediante dois técnicas distintas: i) inferência booleana; e ii) Inferência analítica. Os dois métodos foram avaliados mediante tabulação cruzada com a carta de solos e a carta hidrogeológica, obtendo resultados satisfatórios. Isto estimula a motivação para continuar desenvolvendo sistemas de inferência de dados

Técnicas baseadas na geometria fractal permitiram melhorar a resolução de uma superfície topográfica; os resultados foram comparados com uma simulação feita mediante um interpolador bi-linear. A simulação feita por médio de fractais apresentou resultados mais realistas e com maior coerência com as condições do terreno.

O terreno simulado mediante algoritmos de interpolação fractal permitiu gerar linhas de drenagem, obtendo resultados satisfatórios e coerentes com as condições do meio físico.

10.2 ORIENTAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A rugosidade e a densidade de drenagem são parâmetros que podem ser usados em outras vertentes das geociências, de forma que as estimações propostas permitem ser interpretadas para fins agronômicos, agrícolas, hidrológicos, de mineração, entre outros.

Dados os potenciais da geometria fractal no domínio da cartografia geotécnica, seria interessante avaliar os estimadores propostos (rugosidade e densidade de drenagem) em outros modelos de inferência de dados do meio físico (Mapeamento digital de solos).

A simulação de terrenos fractais pode ser usada para regenerar informação contida em mapas históricos ou modelar condições com dados cartográficos escassos.

A geometria do relevo pode ser estudada em níveis microscópicos, para caracterizar tipos de solo a partir de imagens microscópicas da topografia ou cristalografia, por exemplo, elaborando uma classificação granulométrica baseada no histograma de dimensões fractais (ou de qualquer outro índice de rugosidade) de um mapa da microtopografia da superfície de uma amostra de solo.

Estes conceitos também têm potencial para caracterizar ou mapear discontinuidades de maciços rochosos e elaborar classificações do grau de fraturamento, a partir de imagens binárias de conjuntos de discontinuidades da face de uma superfície rochosa.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. L. (1997). Zoneamento Geotécnico Geral do Distrito Federal: Procedimentos Metodológicos e sua Inserção na Gestão Ambiental. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, SP, 269 p.
- ALLAIN, C. & CLOITRE, M. (1991). Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical review A*, Vol. 44, No. 6, 3552-3558.
- ALVES-JUNIOR, S. & BARROS-FILHO (2005). Enhancing urban analysis through lacunarity multiscale measurement. UCL working paper series 97, p. 1-19. Disponível em: http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper97.pdf. consulta: 13/10/2011
- ARCAYA, S. G. CH. (2007). Avaliação dos fatores condicionantes dos processos erosivos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-156/07, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 189 p.
- BARABÁSI, A.L. (1995). Fractal concepts in surface growth. Cambridge university press, Melbourne, Australia, 386p.
- BARROS-FILHO, M.N. & SOBREIRA, F.J.A. (2008). Accuracy of lacunarity algorithms in texture classification of high spatial resolution images from urban áreas. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing 2008, p. 417-422.
- BAUMANN, G., BARTH, A. & NONNENMACHER, T.F. (1994). Measuring fractal dimensions of cell contours: practical approaches and their limitations. In: Nonnenmacher, T.F., Losa, G.A., Weibel, E.R. (Eds.), *Fractals in Biology and Medicine*. Birkha user Verlag, Bale, Switzerland, pp. 182- 189.
- BELCHER, D.J. (1995). Relatório Belcher: O relatório técnico sobre a nova capital da República. GDF, Secretária de Fazenda e Planejamento, CODEPLAN, 4ª edição, Brasília, DF, Brasil, 316p.
- BÉRUBÉ, D. & JÉBRAK, M. (1999). High precision boundary fractal analysis for shape Characterization. *Computers & Geosciences*, Vol. 25, p. 1059-1071.
- BRASIL/Ministerio do Meio Ambiente (2001). Programa Zoneamento Ecológico-Econômico – Diretrizes Metodológicas para o Zoneamento Ecológico-Econômico no Brasil, Brasília, MMA/SDS.
- CAMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J. (1996). SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. . *Computers & Graphics*, Vol. 20, No 3, p. 395-403.

- CHEN, J. & SHI, X. (2011). Study of Real Sense Terrain Generating Based on Fractal. *Procedia Engineering*, Vol. 12, p. 54–59
- CHICA-OLMO, M. & ABARCA-HERNÁNDEZ, F. (2005). Variogram derived image texture for classifying remotely sensed images. Remote sensing image analysis including the spatial domain, De Jong, S.M, Van Deer Meer, F.D. (eds), Springer, EUA, 360 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1980). Geomorfologia. Edgard Blucher Ltda, 2ª edição, São Paulo, SP, Brasil, 188p.
- CIEPLAK, M., GIACOMETTI, A., MARITAN, A., RINALDO, A., RODRIGUEZ-ITURBE, I. & BANAVAR, J.R. (1998). Models of fractal river Basins. *Journal of Statistical Physics*, Vol. 91, p. 1-15
- CRULS, L. (1995). Relatório Cruls: Relatório da comissão exploradora do Planalto Central do Brasil. GDF, Secretaria de Fazenda e Planejamento, CODEPLAN, 6ª edição, Brasília, DF, Brasil, 380p.
- DAYA-SAGAR B.S., OMOREGIE, C. & PRAKASA-RAO, B.S. (1997). Morphometric Relations of Fractal-Skeletal Based Channel Network Model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol. 2, p. 77-92.
- DE MELO, R.H.C (2007). Using fractal characteristics such as fractal dimension, lacunarity and succolarity to characterize texture patterns on images. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Fluminense, Escola de engenharia e Instituto de Computação, Niterói, RJ, Brasil, 97 p.
- DEARMAN, W.R. (1991). Engineering Geological Mapping. Butterworth-Hemerham, Oxford, UK, 387 p.
- DOMBRÁDI, E., TIMÁR, G., BADA, G., CLOETINGH, S. & HORVATH, F. (2007). Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian–Pannonian system. *Global and Planetary Change*, Vol. 58, p. 197–213.
- DONG, P. (2000). Lacunarity for spatial heterogeneity measurement in GIS. *Geographic information sciences*, Vol. 6, No. 1, p. 20-26.
- DURY, G.H. (1951). Quantitative measurement of available relief and depth of dissection. *Geological magazine*, Vol. 88, p. 339-343.
- EDEN, M., 1961. A two-dimensional growth process, Neyman, R. (Ed.). *4th Berkeley Symp. Math. Stat. Prob., Biology and Health Problems*, vol. 4, Univ. of California Press, Berkeley.
- EGLASH, R. (1999). African Fractals: modern computing and indigenous design. Rutgers University Press, New Jersey, NY, USA, 258p.
- EMBRAPA (1978). Mapa Pedológico do Distrito Federal em formato digital, na escala 1:100.000. Brasília, DF.

- EVANS, I.S. (2010). Geomorphometry and landform mapping: what is a landform?. Paper for 41st International Binghamton Geomorphology Symposium (BGS), Oct. 15-17, 2010, Columbia, South Carolina, 50 p.
- FEDER, J. (1988). *Fractals*. Plenum Press, New York, NY, USA. 283 p.
- FELL, R., COROMINAS, J., BONARD, C., CASCINI, L., LEROI E. & SAVAGE. W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. In: JTC-1 Joint technical committee on landslides and engineered slopes. *Engineering Geology*, Vol. 102, pp 83-111.
- FOURNIER, A., FUSSELL, D. & CARPENTER, L. (1982). Computer rendering of stochastic models. *Communications of the ACM*, Vol. 25, No, p. 371–384.
- FRANCESCHETTI, G. & RICCIO D. (2007). Scattering, natural surfaces and fractals. Elsevier, Burlington, MA, USA, 290 p.
- FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J.E.G. (1998). Geologia do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. (eds), In IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 1, Parte I, pp. 1-87.
- GAUDIO, R., DE BARTOLO, S. G., PRIMAVERA, L., GABRIELE, S. & VELTRI, M. (2006). Lithologic control on the multifractal spectrum of river networks. *Journal of Hydrology*, Vol. 327, p. 365– 375.
- GDF/PDOT (2005). Revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal. Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação, Brasília, DF, 28 p.
- GOMARASCA, M.A. (2004). *Basics of Geomatics*. Springer, New York, NY, USA, 656 p.
- GOODCHILD, M.F. & MARK, D.M. (1987). The fractal nature of geographic phenomena. *Annals of the association of American geographers*. Vol. 77, P. 265-278.
- GUY, M. (1966). Quelques principes et quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. *Archives internationales de photogrammétrie*, Vol. XVI, p. 21-46
- GROHMANN, C.H, SMITH, M.J. & RICCOMINI, C. (2011). Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 4, p. 1200-1213.
- HACK, J. (1957). Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Meryland. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap*, Vol. 294-B, 97 p.
- HAMILTON, S.K., MELACK, J.M., GOODCHILD, M.F. & LEWIS JR., W.M. (1992). Estimation of the fractal dimension of terrain from lake size distribution. *Lowland Floodplain Rivers: A Geomorphological Perspective*, P.A. Carling, G.E. Petts (eds), Willey & Sons, p. 145-164

- HENGL, T. & REUTER, H.I. (2009). *Geomorphometry: Concepts, software and applications*. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 775 p.
- HOLDEN, E.J., DENTITH, M. & KOVESI, P. (2008). Towards the automated analysis of regional aeromagnetic data to identify regions prospective for gold deposits. *Computers & Geosciences*, Vol. 34, p. 1505–15013.
- HORTON, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative Morphology. *Bulletin of the Geological Society of Am.* Vol. 56, p. 275-370.
- HOWARD, A.D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: A summation. *The Am. Association of Petroleum Geologists*. Bul. 51, N° 11.
- HUAXING, L. (2008). Modelling terrain complexity. *Advances in digital terrain analysis*, Q. Zhou, B. Lees & G. Tang (eds), Springer, Berlin, Alemanha, p. 159-176.
- HUGGETT, R.J. (1975). Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, Vol. 13 (1), p. 1–22.
- IRVIN, B.J., VENTURA, S.J. & SLATER B.K. (1997). Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma*, Vol. 77, p. 137-154.
- KING, R.B. (1970). A parametric approach to land system classification. *Geoderma*, Vol. 4 p. 37-46
- JU, W. & LAM, N.S.N (2009). An improved algorithm for computing local fractal dimension using the triangular prism method. *Computers & Geosciences*, Vol. 35, p. 1224–1233.
- LA BARBERA, P. & ROSSO, R. (1989) On the fractal dimension of stream networks, *Water Resources Research*, Vol. 25, p. 735-741
- LAM, N.S.N. (1990). Description and measurement of landsat TM images using fractals. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 56, p. 187-195.
- LAGACHERIE, P. (2006). Digital soil mapping: a state of the art. *Digital Soil mapping with limited data*, Hartemik, A.E., McBratney, A. & Mendonça-Santos, M.L, (eds), Springer, Springer, New York, NY, USA, p. 3-14.
- LI, Z., ZHU, Q. & GOLD, C. (2005). *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 318 p.
- LONGLEY, P.A, GOODCHILD, M.F, MAGUIRE, D.J & RHIND, D.W. (2005). *Geographical information systems and science* (2nd edition). Wiley & Sons Ltda, Chichester, Uk, 517 p.
- LUCHISHEVA, A. (1950). *Practical Hydrology*, Gidrometeoizdat, Leningrad (em Russo).

- MAÎTRE, H. & PINCIROLI, M. (1999). Fractal characterization of a hydrological basin using sar satellite images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 37, no. 1, 25p.
- MANDELBROT, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, New York, NY, USA, 480 p.
- MANDELBROT, B. & VAN NESS, J.W. (1968). Fractional Brownian motion, fractional Gaussian noise, and their applications. *SIAM Reviews*, Vol. 10, 422-437.
- MANDELBROT, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, Vol. 156, p. 636–638.
- MARTINS, E. S. (1998). Sistemas Pedológicos do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. (eds), In IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 1, Parte III, pp. 1-25
- MARTINS, E. S. & BAPTISTA, G.M.M. (1998). Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. (eds), In IEMA/SEMATEC/UnB 1998. Brasília, DF, Vol. 1, Parte II, pp. 1- 53.
- MCBRATNEY, A.B., MENDONÇA-SANTOS, M.L & MINASNY, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, Vol. 117, p. 3– 52.
- MILLER, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage-basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. *Off. Nav. Res. (U.S.) , Geogr. Branch Project* , p. 389-042.
- MINÁR, J. & EVANS, I.S. (2008). Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, Vol. 95, p. 236–259.
- MONTERO-PASCUAL, M.E. (2003). Aplicação de técnicas de análise multifractal a distribuições de tamanho-volume de partículas de solo obtidas mediante análise por difração laser. Tese de doutorado, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de matemática aplicada a la agronomía, Madrid, Espanha, 200 p. (Em espanhol).
- MUELLER, J.E. (1968). An introduction to hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, Vol. 58(2), p. 371-85.
- NIEMANN, J.D., BRAS, R.L., VENEZIANO, D. & RINALDO, A. (2001). Impacts of surface elevation on the growth and scaling properties of simulated river networks. *Geomorphology*, Vol. 40, p. 37–55
- NIKORA, V. & SAPOZHNIKOV V. (1993). River network fractal geometry and its computer simulation. *Water Resources Research*, Vol. 29, P 3569–3575.

- NOVAES, M. P. (1994). Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal. Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas, In: M. Novaes Pinto (org), Editora da Universidade de Brasília, Brasília, DF, pp. 285-344.
- PENNOCK, D.J., ZEBARTH, B.J. & DE JONG, E. (1987). Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, Vol. 40, p. 297–315.
- PÉREZ, A. & PÉREZ, A.C. (2004). Cartografia digital. VII curso de cartografia digital e sistemas de información geográfica, agencia Espanhola de cooperação internacional, Cartagena, Colombia, 300p. (Em espanhol).
- POSADAS, A., GIMÉNEZ, D. & QUIROZ, R. (2002). Análise multifractal da variabilidade espacial da condutividade hidráulica num solo estratificado. *Revista de Investigación de física*, Vol. 5, p. 36-43. (Em espanhol)
- POSADAS, A., GIMÉNEZ, D., BITTELLI, M., VAZ, C.M.P. & FLURY, M. (2001). Multifractal Characterization of Soil Particle-Size Distributions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 65, p. 1361–1367.
- RINALDO, A., RODRIGUEZ-ITURBE, I., RIGON, R., IJJASZ-VASQUEZ, E. & BRAS R.L. (1993). Self-organized fractal river networks. *Physical review letters*, V. 70, No. 6, p. 822-825.
- RINALDO, A., RODRÍGUEZ-ITURBE, I., RIGON, R., BRAS, R.L., IJJASZ-VASQUEZ, E. & MARANI, A. (1992). Minimum energy and fractal structures of drainage networks. *Water resources research*, Vol. 28, No 9, p. 2183-2195.
- ROACH, D.E. & FOWLER, A.D. (1993). Dimensionality analysis of patterns: fractal measurements. *Computers & Geosciences* 19 (6), 849-869.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I. & RINALDO, A. (2001). Fractal river basins: Chance and self-organization. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 561 p.
- ROMÃO, P. de A. & SOUZA, N.M. (2007). Compartimentação do terreno com base na entropia do relevo – Modelagem da região de Goiânia – GO. 6º Simposio Brasileiro de Cartografia geotécnica e geoambiental, Uberlândia, MG, Brasil, p. 487 – 501.
- ROSSO, R., BACCHI, B. & LA BARBERA, P. (1991). Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resources Research*, Vol. 27, p. 381–387.
- ROQUE, W.V. (2006). Mapeamento Geoambiental da Área Urbana de Manaus - AM. Dissertação de Mestrado, publicação nº G.DM-145/06, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 162p.
- RUSS, J.C. (2007). The image processing handbook. Taylor & Francis group, Boca Raton, FL, USA, 836p.
- RUSS, J.C. (1993). Fractal surfaces. Plenum press, New York, NY, USA, 313p.

- SAHIMI, M. (2000). Characterization of Geology of, and Flow and Transport in, Field-Scale Porous Media: Application of Fractal and Percolation Concepts. *Handbook of Porous Media*, Vafai, K. & Dekker, M. (eds), New York, NY, USA, p. 113-170.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1967). A stochastic model for drainage patterns into an intramontane trench. *Bull. Assoc. Sci. Hydrol*, Vol. 12, p. 15–20.
- SCHIMDT, J. & HEWITT, A. (2004). Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, Vol. 121, p. 243–256.
- SCHMIDT, J. & DIKAU, R. (1999). Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models — Semantics, methods, future needs. em GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modelling of the Natural Environment, editado por Dikau, R. & Saurer, H., 153-173. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1999.
- SCHULLER D.J., RAO, A.R., & JEONG, J.R. (2001). Fractal characteristics of dense stream networks. *Journal of Hydrology*. Vol. 243, p. 1–16.
- SCHUMM, S. (1978). Drainage basin morphology. Academic Press, New York, NY, USA, 349 p.
- SCHUMM, S. (1972). River morphology. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa, USA, 421p.
- SCHUM, S. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboi, New Jersey. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 67(5), p. 597-646.
- SCOTT, R.M. & AUSTIN, M.P. (1971). Numerical classification of land systems using geomorphological attributes. *Australian geographical studies*, Vol. 9, p. 33-40.
- SHARY, P.A. (2008). Models of topography. *Advances in digital terrain analysis*, Q. Zhou, B. Lees & G. Tang (eds), Springer, Berlin, Alemania, p. 29-57.
- SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R. (2011a). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. *Computers & Geosciences*, Vol. 37, p. 250–260.
- SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R. (2011b). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. *Computers & Geosciences*, Vol. 37, p. 261–271
- SHAHZAD, F., MAHMOOD, S. A. & GLOAGUEN, R. (2010). Nonlinear analysis of drainage systems to examine surface deformation: an example from Potwar Plateau (Northern Pakistan). *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 17, p. 137–147.
- SHARY, P.A., SHARAYA, L.S. & MITUSOV, A.V. (2005). The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Vol. 28, p. 81–101.

- SHREVE, R. L. (1974). Variation of mainstream length with basin area in river networks. *Water resources Research*. Vol 10, p. 1167-1177.
- SIU, N. & LAM, N. (1990). Description and measurement of landsat TM images using fractals. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 56, No 2, p. 187-195
- SOARES, P.C & PIO FIORI, A. (1978). Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Boletim geográfico*, Vol. 258/259, p. 35-59.
- SOUZA, N. M. (1998a). Áreas para disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Distrito Federal. Relatório de Pós-Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 61 p.
- SOUZA, N. M. (1998b). Imagens do Distrito Federal. Comunicação pessoal, janeiro de 2012, Universidade de Brasília, Pós-Graduação em Geotecnia, Brasília, DF, Brasil.
- SPEIGHT, G.J. (1976). Landform pattern description from aerial photographs. *Photogrammetria*, Vol. 32, p. 161-182.
- STRAHLER, A. N. (1958). Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *GSA Bulletin*, Vol. 69, p. 279 - 300.
- STRAHLER, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Sec. Am. Bull.*, Vol. 63, p. 1117-1142.
- SUERTEGARAY, D.M.A., Suertegaray, M.S, Bellanca, E.T., Fachinello, A. & Cândido, L.A., Silva, C.R. (2003). Terra: Feições ilustradas. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil,
- SUGUIO, K. & BIGARELLA, J. (1990). Ambientes fluviais. UFSC, 2^a edição, Florianópolis, SC, 185p.
- SUNG, Q.CH. & CHEN, Y.CH. (2004). Self-affinity dimensions of topography and its implications in morphotectonics: an example from Taiwan. *Geomorphology*, Vol. 62, P. 181-198.
- TAKAYASU, H. (1990). Fractals in the Physical Sciences. Manchester University Press, Manchester, UK, 170p.
- TARBOTON, D. G. (1996). Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity. *Journal of Hydrology*, Vol. 187, p. 105-117.
- TAUD, H. & PARROT, J.F. (2005). Measurement of DEM roughness using the local fractal dimension. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, Vol. 10, p. 327-338
- TEIXEIRA GUERRA, A. (1987). Dicionário Geológico – Geomorfológico. IBGE, 7^a edição, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 446p.
- TOLENTINO, M & GANDOLFI, N., & PARAGUASSU, A. (1968). Estudo morfométrico das bacias hidrográficas do Planalto de São Carlos. *Rev. Bras. Geogr.*, Vol. 30(4), p. 42 - 50.

- TOLLE, C.R., McJUNKIN, T.R. & GORSICH, D.J. (2008). An efficient implementation of the gliding box lacunarity algorithm. *Physica D*, Vol. 37, p. 306-315.
- TUCKER, G.E., CATANI, F., RINALDO, A. & BRAS, R.L. (2001). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, Vol. 36, p. 187-202.
- UNESCO/IAEG (1976). Engineering Geological Maps. A guide to their Preparation, The UNESCO Press, Paris, Francia, 79 p.
- VADAKKAN, T.J. (2009). Multifractal spectrum of a binary image. Matlab central, disponível em <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25260-multifractal-spectrum-of-a-binary-image>. consulta: 10/01/2012
- VELTRI, M., VELTRI, P. & MAIOLO, M. (1996). On the fractal description of natural channel networks. *Journal of Hydrology*, Vol. 187, p. 137-144.
- VERHASSELT, Y. (1961). Essai de mise au point d'une methode rapide de mesure de longueurs et de surfaces. *Bull. Soc. Belge Geogr.*, Vol. 85, p.131 - 144. (em Frances)
- VICSECK, T. (1992). Fractal growth phenomena. World scientific publishing, London, UK, 495p.
- VIDAL-VÁZQUEZ, E., VIVAS-MIRANDA, J.G. & PAZ-GONZÁLEZ, A. (2005). Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. *Ecological Modelling*, Vol. 182 p. 337-353
- VOSS, R.F. (1985). Random fractal forgeries. Fundamental algorithms for computer graphics, Eamshaw, R.A. (Ed), OTAN ASI series, F17, p. 805-835.
- WEN, R. & SINDING-LARSEN, R. (1997). Uncertainty in Fractal Dimension Estimated from Power Spectra and Variograms. *Mathematical Geology*, Vol. 29, No. 6, p. 727-753
- WILKINSON, D. & WILLEMSSEN, J.F. (1983). Invasion percolation: a new form of percolation theory. *Journal of Physics*, Vol. 16, p. 3365-3376.
- WILSON, J.P., AGGETT, G., DENG, Y. & LAM, C.S. (2008). Water in the Landscape: A Review of Contemporary Flow Routing Algorithms. *Advances in digital terrain analysis*, Q. Zhou, B. Lees & G. Tang (eds), Springer, Berlin, Alemanha, p. 213-236.
- WITTEN, T.A. & SANDER, L.M. (1981). Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomom. *Physical review letters*, Vol. 47, p. 1400-1403
- XIE, H., WANG, J.A & STEIN, E. (1998). Direct fractal measurement and multifractal properties of fracture surfaces. *Physics letters A*, Vol. 242, p. 41-50.
- XIE, H. & WANG, J.A. (1999). Direct fractal measurement of fracture surfaces. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, p. 3073-3084

- ZAHOUANI, H., VARGIOLU, R. & LOUBET, J.L. (1998). Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math. Comput. Modelling*, Vol. 28, No. 4-8, p. 517-534.
- ZĂVOIANU, I. (1978). Morphometry of drainage basins. Elsevier, Amsterdam, Holanda, segunda edição, 251p.
- ZHOU, G. & LAM, N.S.N. (2005). A comparison of fractal dimension estimators based on multiple surface generation algorithms. *Computers & Geosciences*, Vol. 31, p. 1260–1269.
- ZHU, Q. (1996). Fractal-based analysis and realistic display: The theory and application to DTM. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, Vol 31, p. 1007-1010.
- ZUQUETTE, L.V. & GANDOLFI, N. (2004). Cartografia geotécnica. Oficina de textos, São Paulo, SP, Brasil, 19 p

ANEXOS

Anexo 1. Código em Matlab ® para estimar a dimensão fractal

```
%Box-counting diferencial
%Estima a dimensão fractal localmente, varrendo uma imagem binária
'img';
%de tamanho uXv mediante uma janela móvel 'c' de tamanho 'w'
%O produto é uma outra imagem 'mapa' equivalente a um mapa de dimensão
fractal de 'img'
%-----%
%Mateo Arenas Rios
%Universidade de Brasília, Pós-Graduação em Geotecnia
%marensr@gmail.com
%2012
%-----%
close all
clear all
clc
%
img = imread('nome_do_arquivo.png'); % no caso de arquivos em formato
de imagem
% img = load('nome_do_arquivo.txt'); % no caso de arquivos ascci
binários
tam= size(img);
u=tam(1);
v=tam(2);
%
width = 128; % Tamanho da janela móvel (deve ser potência de 2)
p = log(width)/log(2); % Número de Iterações da contagem
%
for k=1:u-width
    for l=1:v-width
        c = img(k:k+width-1,l:l+width-1); % janela móvel
        n=zeros(1,p-2); % Vetor com o número de células de tamanho r
        %
        %----- Contagem de células -----
        ---%
        %
        n(p+1) = sum(c(:));
        for g=(p-1):-1:3
            %descartam-se as 3 últimas iterações para diminuir o tempo
de processamento e o erro de cálculo da DF
            siz = 2^(p-g);
            siz2 = round(siz/2);
            for i=1:siz:(width-siz+1)
                for j=1:siz:(width-siz+1)
                    c(i,j) = ( c(i,j) || c(i+siz2,j) || c(i,j+siz2) ||
c(i+siz2,j+siz2) );
                end
            end
            n(g+1) = sum(sum(c(1:siz:(width-siz+1),1:siz:(width-
siz+1)))));
```

```

end
n = n(end:-1:4);% Número de células (até a iteração p-3)
r = 2.^(0:p-3); % Tamanho de célula (1, 2, 4, 8...p-3);
%-----%
if n == 0 %Eliminar indeterminações quando a janela móvel fica
num espaço em branco
df=0;
else
df=polyfit(log(1./r),log(n),1); %regressão linear
end
mapa(k+width/2,l+width/2)= df(1);
clear df n r c;
end
end
%As primeiras width/2 filas e colunas do "mapa" serão zeros; as
últimas width/2 filas
%e colunas do arquivo original não são mapeadas
mapa= mapa(width/2+1:end,width/2+1:end); %apagar as filas e colunas
zeradas (primeiras 64)
%salvar em formato ascii
save mapa_fractal.txt mapa /ascii

```

Anexo 2. Código na linguagem LEGAL do Spring® para estimar o desvio padrão e o índice de lacunaridade

```

{
//Estimação de dois parâmetros da rugosidade de superfícies: 1) Desvio
Padrão da declividade, de acordo com Grohmann et. al. (2011); 2)
Índice de Lacunaridade, de acordo com Mandelbrot (1982)
// O kernel (janela móvel) é de 7x7 pixels

Numerico Decl("Meio_fisico"), media("Rugosidade"),
DesPadDecl("Rugosidade"), Lacunaridade("Rugosidade");

Decl = Recupere(Nome ="Declividade");

DesPadDecl = Novo(Nome = "Desv_pad_decl_7", ResX = 5, ResY = 5, Escala
= 10000, Min = -10000, Max = 10000 );

Lacunaridade = Novo(Nome = "Lacunaridade_7", ResX = 5, ResY = 5,
Escala = 10000, Min = -10000, Max = 10000 );
media = Novo(Nome = "promedio_decl_7", ResX = 5, ResY = 5, Escala =
10000, Min = -10000, Max = 10000 );

media = (Decl[-3,-3]+Decl[-2,-3]+Decl[-1,-3]+Decl[0,-3]+Decl[1,-
3]+Decl[2,-3]+Decl[3,-3]+Decl[-3,-2]+Decl[-2,-2]+Decl[-1,-2]+Decl[0,-
2]+Decl[1,-2]+Decl[2,-2]+Decl[3,-2]+Decl[-3,-1]+Decl[-2,-1]+Decl[-1,-
1]+Decl[0,-1]+Decl[1,-1]+Decl[2,-1]+Decl[3,-1]+Decl[-3,0]+Decl[-
2,0]+Decl[-1,0]+Decl[0,0]+Decl[1,0]+Decl[2,0]+Decl[3,0]+Decl[-
3,1]+Decl[-2,1]+Decl[-
1,1]+Decl[0,1]+Decl[1,1]+Decl[2,1]+Decl[3,1]+Decl[-3,2]+Decl[-
2,2]+Decl[-1,2]+Decl[0,2]+Decl[1,2]+Decl[2,2]+Decl[3,2]+Decl[-
3,3]+Decl[-2,3]+Decl[-
1,3]+Decl[0,3]+Decl[1,3]+Decl[2,3]+Decl[3,3])/49;

//Desvio padrão da declividade
DesPadDecl= sqrt((((Decl[-3,-3]-media)^2)+((Decl[-2,-3]-
media)^2)+((Decl[-1,-3]-media)^2)+((Decl[0,-3]-media)^2)+((Decl[1,-3]-
media)^2)+((Decl[2,-3]-media)^2)+((Decl[3,-3]-media)^2)+((Decl[-3,-2]-
media)^2)+((Decl[-2,-2]-media)^2)+((Decl[-1,-2]-media)^2)+((Decl[0,-
2]-media)^2)+((Decl[1,-2]-media)^2)+((Decl[2,-2]-media)^2)+((Decl[3,-
2]-media)^2)+((Decl[-3,-1]-media)^2)+((Decl[-2,-1]-media)^2)+((Decl[-
1,-1]-media)^2)+((Decl[0,-1]-media)^2)+((Decl[1,-1]-
media)^2)+((Decl[2,-1]-media)^2)+((Decl[3,-1]-media)^2)+((Decl[-3,0]-
media)^2)+((Decl[-2,0]-media)^2)+((Decl[-1,0]-media)^2)+((Decl[0,0]-
media)^2)+((Decl[1,0]-media)^2)+((Decl[2,0]-media)^2)+((Decl[3,0]-
media)^2)+((Decl[-3,1]-media)^2)+((Decl[-2,1]-media)^2)+((Decl[-1,1]-
media)^2)+((Decl[0,1]-media)^2)+((Decl[1,1]-media)^2)+((Decl[2,1]-
media)^2)+((Decl[3,1]-media)^2)+((Decl[-3,2]-media)^2)+((Decl[-2,2]-
media)^2)+((Decl[-1,2]-media)^2)+((Decl[0,2]-media)^2)+((Decl[1,2]-
media)^2)+((Decl[2,2]-media)^2)+((Decl[3,2]-media)^2)+((Decl[-3,3]-
media)^2)+((Decl[-2,3]-media)^2)+((Decl[-1,3]-media)^2)+((Decl[0,3]-
media)^2)+((Decl[1,3]-media)^2)+((Decl[2,3]-media)^2)+((Decl[3,3]-
media)^2))/48);

//Lacunaridade
Lacunaridade = (DesPadDecl/media)^2;
}

```

Anexo 3. Código em Matlab® para interpolar superfícies fractais

```
%Programa para melhorar a resolução de superfícies
%baseado no algoritmo 'Midpoint Displacement'
%precisa da sub-rotina 'land.m' (Anexo 4)
%-----%
%Mateo Arenas Rios
%Universidade de Brasília, Pós-Graduação em Geotecnia
%marenasr@gmail.com
%2012
%-----%

clear all
clc
sup = load('superficie.txt'); %carregar superfície em formato ascii
Res_ini = 5; % resolução inicial (m x pixel)
k=17;      % Tamanho da ampliação horizontal da superfície (ou 2^n+1)
tam_sup = size(sup);
largura = tam_sup(1);
anchura = tam_sup(2);
Res_fin = Res_ini*largura/(((k-1)*largura+(k-2))); %Resolução final (m
x pixel)
global H
H = 0.7408; % Coeficiente de Hurst (0<H<1), superfície mais rugosa
quanto H mais perto de 0
for i=1:largura-1
    for j=1:anchura-1
        A=zeros(k); %matriz de interpolação
        A([1 k],[1 k])=[sup(i,j) sup(i,j+1); sup(i+1,j)
sup(i+1,j+1)]; % Alturas iniciais nos quatro cantos
        B=land(A); % B é o segmento interpolado
        clear A
        Nova_sup((i-1)*k-(i-2):(i-1)*k-(i-2)+(k-1),(j-1)*k-(j-
2):(j-1)*k-(j-2)+(k-1))=B;
    end
end

save Nova_sup.txt Nova_sup /ascii %salvar em formato ascii
```

**Anexo 4. Código em Matlab® do arquivo land.m associado ao anexo 3, para
interpolair superfícies fractais**

```

%-----%
%Mateo Arenas Rios
%Universidade de Brasília, Pós-Graduação em Geotecnia
%marenasr@gmail.com
%2012
%-----%

function B=land(A) % programa para desenhar paisagens aleatórias
%Baseado em:
%http://www.sfu.ca/~rpyke/335/fractal_landscape/fractal_lands.html
%http://www.sfu.ca/~rpyke/335/fractal_landscape/land.m

% A é um quadrado cujo tamanho é N=2^k+1
% Os quatro vértices de A são usados como parâmetros de entrada.
%
% Para usar o código individualmente:
%
% k=2^5+1; % ou 2^n+1 para qualquer inteiro positivo n
% A=zeros(k);
% A([1 k],[1 k])=[1 1.25; 1.1 2.0]; % Alturas iniciais
nos quatro cantos
%% H = 0.8 % Coeficiente de Hurst (0<H<1), superfície mais
rugosa quanto H mais perto de 0
% B=land(A); % B é a paisagem fractal
% Surf(B)

N=size(A,1);
f=(N+1)/2;
global H
scalef=0.05*(2^H); % Ajuste o 0.05 para obter diversos efeitos

B=A;
% randn é um número aleatório associado aos deslocamentos verticais
B(f,f)=mean([A(1,1),A(1,N),A(N,1),A(N,N)])+scalef*abs(randn);
B(1,f)=mean([A(1,1),A(1,N)])+scalef*abs(randn);
B(f,1)=mean([A(1,1),A(N,1)])+scalef*abs(randn);
B(f,N)=mean([A(1,N),A(N,N)])+scalef*abs(randn);
B(N,f)=mean([A(N,1),A(N,N)])+scalef*abs(randn);

if N>3
    B(1:f,1:f)=land(B(1:f,1:f));
    B(1:f,f:N)=land(B(1:f,f:N));
    B(f:N,1:f)=land(B(f:N,1:f));
    B(f:N,f:N)=land(B(f:N,f:N));
end

```

