UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

APLICAÇÃO DE ANÁLISE FRACTAL EM REDE DE DRENAGEM E RELEVO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DE TERCEIRA ORDEM DE RAMIFICAÇÃO

ROBERTO BERNARDO DE AZEVEDO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do titulo de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Maio - 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

APLICAÇÃO DE ANÁLISE FRACTAL EM REDE DE DRENAGEM E RELEVO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DE TERCEIRA ORDEM DE RAMIFICAÇÃO

ROBERTO BERNARDO DE AZEVEDO

Orientador: **Prof[a] Dr[a] Wolmar Apparecida de Carvalho**

Co-Orientador: **Prof. Dr.Anselmo José Spadotto**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do titulo de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Maio - 2002

À humanidade

OFEREÇO

À minha esposa,

MARIA REGINA e

Ao meu filho,

FÁBIO

DEDICO

"A única atividade mental que muitas pessoas fazem é adivinhar as conclusões. Mas isto não é pensar. Pensar criadoramente é um exercício e um passatempo e resolve problemas".

A. Osborn

"Há homens que lutam um dia e são bons. Há homens que lutam muitos dias e são melhores. Há os que lutam anos e são excelentes. Mas há os que lutam toda a vida. E estes são os imprescindíveis".

Brecht

AGRADECIMENTOS

À *Faculdade de Ciências Agronômicas* - UNESP e ao *Curso de Pós-graduação em Energia na Agricultura*, pela oportunidade de a realização deste trabalho;

Ao *PICDT/CAPES*, pelo auxilio concedido durante a realização deste trabalho, o qual contribuiu sobremaneira para a sua execução e término;

Ao *Departamento de Física, Química e Biologia* da FCT/UNESP, pelo apoio e incentivo;

À Prof[a] Dr[a] *Wolmar Apparecida Carvalho*, por ter sido mais que uma orientadora, uma amiga sempre presente nos momentos de maiores dificuldades, sempre apoiando, incentivando e orientando;

Ao Prof. Dr. *Anselmo José Spadotto*, pelo apoio e orientação na aplicação do método de Análise Fractal dos dados;

Ao Prof. Dr. *Luiz Roberto Almeida Gabriel*, pelo apoio e ter acreditado no caminho a ser percorrido;

Ao Dr. *Wilson Roberto de Jesus*, pela colaboração na realização das análises estatísticas;

Ao Prof. Dr. *Octavio Freire*, pelos ensinamentos e incentivos;

Ao Eng[o] *Ricardo Carvalho Tosin*, pela colaboração e apoio na área computacional;

Ao Prof. *Benedito da Silva*, pela colaboração na tradução de periódicos;

À Bibliotecária *Maria José Trisóglio*, pela colaboração; e

Ao *Criador*, por tudo, agradeço.

SUMÁRIO **Página**

LISTA DE QUADROS..... VIII
LISTA DE FIGURAS..... X
1 RESUMO..... 1
2 SUMMARY..... 3
3 INTRODUÇÃO..... 6
4 REVISÃO DA LITERATURA..... 10
4.1 Bacia Hidrográfica – Composição e Padrão da Rede de Drenagem..... 10
4.2 Relações entre Características da Rede de Drenagem, Relevo e Solos..... 18
4.3 Dimensão Fractal..... 24
4.3.1 Auto-similaridade e dimensão..... 30
5 MATERIAL E MÉTODOS..... 32
5.1 Material..... 32
5.1.1 Descrição geral da área..... 32
5.1.2 Bacias hidrográficas..... 39
5.1.3 Fotografias aéreas..... 39
5.1.4 Material cartográfico e mapas geológico, geomorfológico e pedológico..... 39
5.1.5 Equipamentos..... 39
5.1.6 Malha para determinação da dimensão fractal (D)..... 40
5.1.7 Software..... 40
5.2 Métodos..... 40
5.2.1 Obtenção dos mapas da rede de drenagem..... 40
5.2.2 Seleção da bacias hidrográficas..... 41
5.2.3 Análise da rede de drenagem..... 43
5.2.3.1 Composição da rede de drenagem..... 43
5.2.3.2 Padrão de drenagem..... 45
5.2.4 Análise do relevo..... 46
5.2.4.1 Análise de aspectos do relevo..... 46
5.2.5 Análise fractal..... 47

5.2.6 Análise estatística..... 52
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 54
6.1 Seleção das Bacias Hidrográficas..... 54
6.2 Análise da Rede de Drenagem..... 56
6.2.1 Composição da rede de drenagem..... 67
6.2.2 Padrão de drenagem..... 77
6.3 Análise do Relevo..... 78
6.4 Análise Fractal..... 79
6.4.1 Rede de drenagem..... 79
6.4.2 Relevo..... 87
6.5 Síntese da Discussão dos Resultados..... 93
7 CONCLUSÕES..... 101
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 103

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Classificação e principais características do solo das bacias hidrográficas estudadas segundo Carvalho et al. (1997; 2002).....	36
2	Parâmetros dimensionais das bacias hidrográficas representativas do Argissolo.....	55
3	Resultados da análise dimensional e semelhança geométrica aplicada às bacias hidrográficas representativas do Argissolo.....	56
4	Número, comprimento total e médio de segmentos de rios em cada ordem de ramificação para as bacias hidrográficas estudadas.....	68
5	Valores de razões de ramificação (Rb), comprimento total (Rlw) e comprimento médio (Rl) da rede de drenagem para as bacias hidrográficas estudadas.....	70
6	Equações ajustadas para número (Nw), comprimento total (Lw) e médio (Lmw) de segmentos de rios para as bacias hidrográficas estudadas.....	71
7	Uso do solo nos municípios de Marabá Paulista, Presidente Bernardes e Santo Anastácio em vários períodos, área e porcentagem de cada tipo de uso em relação ao total.....	74
8	Número (Nw), comprimento total (Lw) e comprimento médio (Lmw) em cada ordem de ramificação (w) e total observado e calculado para as bacias hidrográficas estudadas.....	76
9	Índices do padrão de drenagem e classe de textura topográfica para as bacias hidrográficas estudadas.....	78
10	Características do relevo das bacias hidrográficas estudadas.....	78
11	Dimensão Fractal (D) da composição da rede de drenagem, perímetro e área para as bacias hidrográficas estudadas.....	81
12	Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes à composição da rede de drenagem para as bacias hidrográficas (tratamento).....	83
13	Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes à composição da rede de drenagem para as bacias hidrográficas.....	83
14	Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes	

	ao perímetro para as bacias hidrográficas (tratamento).....	84
15	Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes ao perímetro para as bacias hidrográficas.....	84
16	Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes à área para as bacias hidrográficas (tratamento).....	85
17	Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes à área para as bacias hidrográficas.....	85
18	Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) da composição da rede de drenagem, perímetro e área (tratamento B) e as bacias hidrográficas (tratamento A).....	86
19	Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes às bacias hidrográficas para a composição da rede de drenagem, perímetro e área..	86
20	Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes à composição da rede de drenagem, perímetro e área para as bacias hidrográficas.....	87
21	Dimensão Fractal (D) das curvas de nível, comuns às bacias hidrográficas estudadas.....	89
22	Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes às curvas de nível, cotas de 440, 430, 420, 410, 400 e 390 m, para as bacias hidrográficas.....	91
23	Valores médios da Dimensão fractal (D) referentes às curvas de nível, cotas de 440, 430, 420, 410, 400 e 390 metros para as bacias hidrográficas.....	93
24	Síntese das características convencionais e Dimensão Fractal (D) da bacia, rede de drenagem e do relevo para as bacias hidrográficas representativas do Argissolo.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figuras		Página
1	Localização da área de estudo – municípios de Presidente Bernardes, Santo Anastácio e Marabá Paulista no Oeste do Estado de São Paulo (esboço das áreas dos municípios).....	33
2	Representação de uma bacia hidrográfica (bacia 1), com o recobrimento da malha usada para a determinação da dimensão fractal..	48
3	Representação do contorno da bacia hidrográfica (divisor d'água) coberto com a malha, para determinação das dimensões fractais do perímetro e da área da bacia.....	49
4	Representação da rede de drenagem coberta com a malha, para a determinação da dimensão fractal da composição da rede de drenagem.	50
5	Representação das curvas de nível cobertas com a malha, para a determinação da dimensão Fractal das referidas curvas.....	51
6	Bacia hidrográfica 1 representativa do Argissolo, no município de Marabá Paulista.....	57
7	Modelo digital da bacia hidrográfica 1.....	58
8	Bacia hidrográfica 2 representativa do Argissolo, no município de Presidente Bernardes.....	59
9	Modelo digital da bacia hidrográfica 2.....	60
10	Bacia hidrográfica 3 representativa do Argissolo, no município de Presidente Bernardes.....	61
11	Modelo digital da bacia hidrográfica 3.....	62
12	Bacia hidrográfica 4 representativa do Argissolo, no município de Santo Anastácio.....	63
13	Modelo digital da bacia hidrográfica 4.....	64
14	Bacia hidrográfica 5 representativa do Argissolo, no município de Santo Anastácio.....	65
15	Modelo digital da bacia hidrográfica 5.....	66

16 Regressões dos números (Nw), comprimentos totais (Lw) e comprimentos médios (Lmw)de segmentos de rios sobre as ordens de ramificação (w) para o solo estudado..... 72

1 RESUMO

A dimensão fractal se presta a caracterizar fenômenos naturais, irregulares, com maior precisão que as análises convencionais, permitindo uma análise com menores distorções da realidade (Mandelbrot, 1982). Objetivou-se no presente trabalho verificar a fractalidade e avaliar a análise fractal, da rede de drenagem e do relevo de bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação, em comparação com a análise convencional. Foram estudadas cinco bacias hidrográficas pertencentes ao sistema hidrográfico da bacia do Rio Santo Anastácio nos municípios de Marabá Paulista, Presidente Bernardes e Santo Anastácio, compreendidas entre as seguintes coordenadas geográficas: 21º 49' 07'' a 22º 16'54'' de latitude S e 51º 29'27'' a 52º 06'35'' de longitude W Grw. As bacias são homogêneas quanto aos solos classificados por Carvalho et al. (1997; 2002) como ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrúpticos A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subperenifólia e subcaducifólia relevo ondulado (ALFISOLS); litologia e geologia- arenito do Grupo Bauru-Formação Adamantina (IPTb); clima – Aw (Kóppen) e uso com pastagem há mais de vinte anos (Azevedo, 1999). As bacias foram selecionadas pela aplicação do método de análise dimensional e teste de semelhança geométrica (Strahler, 1957; França,1968). Foram utilizadas fotografias aéreas (1:20.000), e cartas planialtimétricas (1:50.000). Os fractais são conjuntos cuja forma é irregular ou fragmentada e têm essencialmente a mesma estrutura em todas as escalas. A análise fractal foi determinada pelo método SPA-BOX (Spadotto, 1998) para a Área, Perímetro e Composição da Rede de Drenagem, que são elementos que melhor definem a relação infiltração/deflúvio e possibilitam a comparação com os parâmetros convencionais

da bacia (França, 1968), da rede de drenagem, composição e padrão (Horton, 1945; Maxwell, 1955; Strahler, 1957 e Vasques Filho, 1972). A análise fractal foi aplicada também para o relevo através das curvas de nível de cotas comuns às bacias e verificados também, os parâmetros convencionais: maior e menor altitude, altitude média, amplitude altimétrica e razão de relevo (Schumm, 1956). As principais conclusões foram as seguintes: - as bacias hidrográficas estudadas são estruturas com Dimensão Fractal (D) do Perímetro, 1,2829; da Área, 1,8926 e da composição da Rede de Drenagem, 1,3397, sob as condições ambientais existentes e do material utilizado para obter a rede de drenagem e as bacias; - o ajuste das equações de regressão simples monologarítmicas, log y = a + bx, para número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios, indica que a rede de drenagem das bacias obedece as Leis hidrofísicas de Horton e Strahler e que seu desenvolvimento se faz em equilíbrio com o ambiente; - A Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem das bacias, com valor médio de 1,3397 indica que a rede de drenagem segue as Leis hidrofísicas; - os valores médios totais da dimensão Fractal (D) do Perímetro, da Área e da Composição da Rede de Drenagem iguais a 1,4884; 1,5302; 1,5116; 1,4715 e 1,1535 diferem para as bacias indicando que foram sensíveis para refletir a perda de similaridade geométrica das bacias que variou de 0,02 a 0,27 e que, na natureza os padrões são similares e não iguais; - os valores médios da Dimensão Fractal (D) do Perímetro, 1,2829; da Área, 1,8926 e da Composição da Rede de Drenagem, 1,3397, das bacias hidrográficas, diferem entre si, indicando que esses parâmetros são importantes para definir a fractalidade das bacias de 3ª ordem de ramificação, e devem ser analisados em conjunto; - Os menores coeficientes de variação obtidos para a Dimensão Fractal (D) do Perímetro, da Área e da Composição da Rede de Drenagem mostram que o processo de obtenção da Dimensão Fractal (D) é mais preciso para caracterizar a bacia e a rede de drenagem em relação aos parâmetros convencionais. - Os valores médios de Dimensão Fractal (D) das curvas de nível das bacias, 1,2081; 1,1875; 1,2683; 1,2776; 1,3277 e 1,3290 para as cotas 440, 430, 420, 410, 400 e 390m, respectivamente, refletem a distribuição espacial fractal das curvas de nível, sob as condições do material cartográfico utilizado.

2 SUMMARY

APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS IN DRAINAGE NETWORK AND RELIEF OF WATERSHED OF THIRD RAMIFICATION ORDER.

Botucatu, 2002. 113f

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ROBERTO BERNARDO DE AZEVEDO

Adviser: PROF[a] DR[a] WOLMAR APPARECIDA CARVALHO

Co-adviser: PROF. DR. ANSELMO JOSÉ SPADOTTO

The fractal dimension contributes to characterize natural and irregular phenomenon with a bigger accuracy that conventional analysis, allowing an analysis with smaller distortions of reality (Mandelbrot, 1982). There was a purpose in this present paper to verity the fractality and to appraise the fractal analysis of the drainage network and of the relief of watersheds of third order ramification, in comparison with the conventional analysis. Five watersheds were studied of third order belonged to the hydrographic system of the Rio Santo Anastácio Watershed, in the Marabá Paulista (watershed 1), Presidente Bernardes (watershed 2 and 3) and Santo Anastácio (watershed 4 and 5) municipalities, between the following geographic coordinates: 21^0 49' 07" to 22^0 16'54" of South latitude and 51^0 29'27"to 52^0 06'35"of West. The watersheds are homogeneous according to the classified soils by Carvalho et al. (1977; 2002) as ALFISOLS; litho logy and geology – sandstone of Group Bauru – Adamantina Formation (IPTb); climate – Aw (Köppen) and use with pasture

more than twenty years ago (Azevedo, 1999). The watersheds were selected by the application of the dimensional analysis method and geometric similarity test (Strahler, 1957; França, 1968). Aerial photos, in a 1:20.000 scale, and hypsometric charts, in a 1:50.000, were used. The fractals are sets whose form is irregular or fractured and have essentially the same structure in all the scales. The fractal analysis was determined by the SPA-BOX (Spadotto, 1998) to the area, perimeter and drainage network of the composition, that are elements that better define the relation infiltration/run-off and makes possible the comparation with the conventional parameters of the watershed (França, 1968), of the drainage network, composition and pattern (Horton, 1945; Maxwell, 1955; Strahler, 1957 and Vasques Filho, 1972). The fractal analysis was also applied to the relief through of the contour line of common quotas to the watersheds and also verified the conventional parameters: larger and smaller altitude, mean altitude, altimetric altitude and relief ratio (Shumm, 1956). The principal conclusions were the following: - the watersheds studied are structures with fractal dimension of the perimeter, 1,2829; of area, 1,8926 and from the drainage network composition, 1,3397, under the environment conditions at hand and from the material utilized to obtain the drainage network and the watersheds; - the adjustment of the equations of monologarítmic simple regressions, log y = a + bx, to number, total length and average length of stream segments, indicates that the drainage network of the watersheds obey the hidrophyisical Horton and Strahler Laws and their development is made in equilibration with the environment; - the Fractal (D) Dimension of the Drainage Network Composition of the watersheds, com average value of 1,3397 indicate that the drainage network follows the hidrophysic Laws; - the total average values of the Fractal (D) Dimension of the Perimeter, of the Area and of the Drainage Network Composition are equal to 1,4884; 1,5302; 1,5116; 1,4715 and 1,1535, these values differ to the watersheds indicating that the were sensible to reflect the loss of geometric similarity of the watersheds that varied from 0,02 to 2,27 and, in the nature the patterns are similar and not equal; - the average values of the Fractal (D) Dimension of the Perimeter, 1,2829; of the Area 1,8926 and of the Drainage Network Composition, 1,3397, of the hydrographic watersheds, differ it selves, indicating that those parameters are important to define fractality of the watersheds of third order ramification, and they must be analyzed together; - the smallest coefficients of variation to the Fractal Dimension (D) of the Perimeter, Area and of the Drainage Network Composition show that

the process of obtaining of the Fractal Dimension (D) is more accurate to characterize the watersheds and the drainage network in relation to conventional parameters; - the average values of Fractal (D) Dimension of the contour lines of the watersheds, 1,2081; 1,1875; 1,2683; 1,2776; 1,3277 and 1,3290 to the quotas 440, 430, 420, 410, and 390m, respectively, they reflect the fractal spatial distribution of the contour lines, under the conditions of the utilized cartographic material.

Keywords: watershed, drainage network, relief, fractal, fractal analysis, fractal dimension.

3 INTRODUÇÃO

A energia do sol, fator preponderante para a vida das plantas e dos animais na terra, torna possível a armazenagem de energia sob a forma de alimento através da fotossíntese e é deste modo que o solo se torna o meio natural para o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais e da biota.

A transferência de energia tem fornecido força para múltiplos fins, e a sua procura aumenta em proporção ao desenvolvimento da civilização. Em um pais em desenvolvimento, torna-se indispensável o aproveitamento dessa fonte de energia através dos recursos naturais. Sendo o solo um dos recursos naturais mais importantes, é dele que o homem tira o sustento, podendo-se afirmar que se assegurando o uso racional do solo, estamos lutando pela nossa própria sobrevivência.

O ambiente natural é constituído de elementos que tendem para um estado de equilíbrio, sendo que, a alteração em qualquer um desses elementos reflete-se em todo o conjunto, mostrando sua fragilidade. O desmatamento, o uso e manejo inadequado do solo causam o rompimento do equilíbrio do ecossistema de uma região e cuja intensidade é função da natureza e propriedades dos solos, condições litológicas estruturais, clima e relevo. O desequilíbrio dos ecossistemas pode ocorrer também, devido a outras alterações de suas condições naturais tais como: construções de aterros, barragens, estradas e expansão urbana, dentre outros.

A resistência à erosão e a capacidade de infiltração dos solos, associada à precipitação pluviométrica, ao relevo e à cobertura vegetal são elementos que, inter-relacionados de forma harmônica, mantêm o equilíbrio do ecossistema de uma área.

Dentre os elementos da paisagem a rede de drenagem e o relevo são utilizados para discriminar solos e áreas edáficas, pela soma de informações que podem fornecer.

A análise da rede de drenagem permite avaliar, através das leis hidrofisicas formuladas para número e comprimento de rios, o efeito de controles geológicos, litológico e ou estrutural, da rede de drenagem e de desequilíbrio dos elementos do ambiente, que causa a erosão laminar e em sulcos, pois estes evoluem formando canais de drenagem que atingindo o sistema hidrográfico desorganizam a sua hierarquização.

O uso do solo com pastagem reduz e controla a erosão, em decorrência do sistema radicular das gramíneas que induzem a agregação e dão estabilidade à estrutura do solo, e ao sistema radicular que permite densa cobertura do terreno, o que aliado ao manejo, dificulta a erosão laminar e em sulco.

O exterior do corpo do solo ou a conformação do terreno constitui um componente muito importante do sistema natural, que cada solo representa (Ranzani, 1965).

Dentre os parâmetros do relevo, a declividade, afetando as taxas de escorrimento superficial e subsuperficial das águas, é um componente de grande significância na determinação de perdas de solo.

As curvas de nível por serem linhas isométricas, que unem pontos de mesma cota acima do nível do mar, possibilitam representar o relevo de uma área em sua planta planialtimétrica respectiva. As elevações, ao contrário das depressões, são distinguidas quando as curvas de nível de maior valor apresentam-se circunscritas às de menor valor. Quando o terreno é levemente inclinado, as curvas de nível apresentam-se muito afastadas umas das outras, e quando é fortemente inclinado muito próximas.

O relevo de uma região apresenta-se constituído de uma grande variedade de tipos de encostas, desde superfícies retilíneas, quase verticais como penhascos, até vertentes suavemente inclinadas que se aproximam da horizontalidade. A maior parte das vertentes apresenta, no entanto, formas convexas – côncavas com ou sem segmentos retilíneos intercalados. A vertente, nada mais é do que o próprio terreno em declive. A vertente plana

apresenta declividade constante e as curvas de nível igualmente espaçadas; a vertente côncava diminui à medida que a encosta desce, com curvas de nível próximas no cume e afastadas na parte baixa; a vertente convexa aumenta à medida que a encosta desce, com curvas de nível espaçadas no cume e próximas na parte baixa.

A análise de elementos da paisagem tem sido feita com base em dados extraídos de fotografias aéreas, decorrentes da escala e da possibilidade da visão tridimensional, que acrescenta à interpretação inúmeros detalhes adicionais de interesse.

Recentemente, a área da Ciência, denominada como área aplicada, ganhou uma importante ferramenta que tem permitido ampliar seus horizontes. Esta ferramenta, também conhecida como ciência do caos e dos fractais, possibilita analisar com o rigor da geometria não-linear os fenômenos que assim se expressam. Esta nova geometria, geometria fractal, possibilita analisar as irregularidades das formas e dos fenômenos de modo a caracterizá-los com suas inerentes características. Esta análise, chamada de análise fractal, tem permitido conhecer e relacionar os fenômenos naturais e artificiais que podem ser expressos através de formas características.

Segundo Mandelbrot (1982) a dimensão fractal se presta a caracterizar fenômenos naturais, irregulares, com maior precisão do que as análises convencionais, porque permite uma análise com menores distorções da realidade.

Assim, a aplicabilidade dessa análise em fenômenos naturais, em particular, à hidrologia possibilitou a introdução da dimensão fractal no estudo das redes de drenagem de bacias hidrográficas.

Alguns trabalhos desenvolvidos atualmente, para a obtenção da Dimensão Fractal (D) de elementos de bacias hidrográficas não permitem comparar os resultados entre si e com outros trabalhos, em virtude das bacias serem obtidas de mapas topográficos com escala pequena, de modo que não consideram as cabeceiras de drenagem que são identificadas em fotografias aéreas; não são relatadas com detalhes as condições ambientais e sem padronização da ordem de ramificação das bacias.

Em vista do exposto, objetivou-se neste trabalho aplicar a análise fractal em rede de drenagem e relevo de bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação sob as mesmas condições ambientais, obtidas de fotografias aéreas, visando avaliar esta análise em conjunto com a convencional através de:

a) Similaridade geométrica das bacias;

b) Rede de drenagem: composição – número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios; padrão – densidade de drenagem, freqüência de rios, razão de textura, razão de textura média e classe de textura topográfica;

c) Determinação de equações de regressão simples monologaritmica, para a aplicação das Leis hidrofísicas através da composição da rede de drenagem;

d) Relevo: maior altitude, menor altitude, altitude média, amplitude altimétrica e razão de relevo.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Os sistemas fluviais têm despertado o interesse de pesquisadores como geólogos, fisíografos e geomorfólogos desde o século passado. Especialistas de outros setores, como engenheiros de estradas, hidrólogos e pedólogos também passaram a estudar as redes de drenagem, por verificarem que as mesmas refletiam certas características dos materiais superficiais sobre os quais se desenvolveram. Todavia, até seis décadas atrás, esses pesquisadores trabalhavam quase que inteiramente em bases descritivas, pois estavam mais interessados em descrever as formas do relevo atual ou identificar a natureza dos solos ou das rochas subjacentes.

Como resultado de suas descobertas, muitos padrões de drenagem foram descritos e classificados, procurando correlaciona-los à natureza dos solos e/ou à presença de estruturas geológicas. Com o impulso dado por Horton (1945) e sob a compreensão crescente de que a análise descritiva clássica tem valor limitado, alguns pesquisadores começaram a tentar, na análise de bacias hidrográficas e suas redes de drenagem, linhas de estudo quantitativas (França, 1968).

4.1 Bacia Hidrográfica – Composição e Padrão da Rede de Drenagem

Uma das primeiras observações importantes, com relação ao comportamento da rede de drenagem, segundo Von Engeln (1942), foi feita por Playfair em

1802, nos seguintes termos: cada rio corre em um vale proporcional ao seu tamanho e o conjunto forma um sistema de vales comunicantes que têm um ajustamento adequado de suas declividades, de modo que, nenhum deles se une ao vale principal num nível demasiadamente superior ou inferior. Esta afirmativa, geralmente conhecida como a Lei das junções concordantes ou Lei de Playfair, considera os rios responsáveis por seus vales e ao mesmo tempo em concordância com eles.

Esclarecendo que a Lei de Playfair envolve a premissa de que os rios principais têm gradientes mais suaves do que os seus tributários, Von Engeln (1942) concorda que essa relação é geralmente observada, exceto em locais onde existem quedas d'água; neste caso resultam junções discordantes e "vales suspensos" de rios tributários podendo aquela relação das declividades ser invertida.

Horton (1945) lançou a base quantitativa da interpretação de bacias hidrográficas e suas redes de drenagem segundo uma aproximação hidrofísica, em que considerou as relações entre infiltração e deflúvio e os processos de erosão pelas águas correntes, esse autor estabeleceu duas leis fundamentais que estendem a Lei de Playfair e lhe confere um significado quantitativo; essas duas leis relacionam o número e o comprimento de rios às diversas ordens de ramificação da rede hidrográfica.

A lei dos números de rios de Horton (1945) expressa a relação entre o número de rios de cada ordem e a ordem de ramificação, em termos de uma série geométrica inversa, da qual a razão de ramificação é a base. Analogamente a lei dos comprimentos de rios do mesmo autor, expressa a relação entre comprimentos médios de rios de cada ordem e a ordem de ramificação, em termos de uma série geométrica direta na qual o primeiro é o comprimento médio dos rios de 1ª ordem.

A lei dos comprimentos totais de rios de Strahler (1957) é semelhante à lei de número de rios de Horton (1945).

De acordo com o sistema europeu de classificar rios em ordens descrito em Gravelius, 1914 citado por Horton (1945), o rio principal é designado como primeira ordem e o os seus tributários imediatos como de segunda ordem e assim sucessivamente. Dessa maneira a ordem mais alta é atribuída aos tributários menores, não ramificados.

Argumentando que esses tributários menores têm características semelhantes, embora se situam em bacias hidrográficas diferentes, Horton (1945) inverteu esta seqüência de numeração, considerando os tributários menores, não ramificados , como de primeira ordem, atribuindo ao rio principal a ordem mais elevada. Esta inversão no sistema de numeração das ordens de ramificação veio facilitar a análise e comparação das redes de drenagem, pois somente são comparáveis os elementos de mesma ordem de ramificação.

Strahler (1957) modificou o sistema de classificação de rios de Horton introduzindo o conceito de segmento de rio. A junção de dois tributários de primeira ordem origina um de segundo ordem e a união destes em segmento de terceira ordem e assim sucessivamente.

Inúmeros pesquisadores adotaram essa classificação, dentre eles França (1968) ao iniciar no Brasil as pesquisas de âmbito quantitativo de bacias hidrográficas e redes de drenagem com vistas à diferenciação de unidades de solo, seguido por vários autores, dentre os quais: Vasques Filho (1972), Freire (1977), e Carvalho (1977), dentre outros.

Horton (1945) considerou que, para um dado terreno, existe um comprimento mínimo de escoamento sobre a superfície, necessário para concentrar um certo volume de deflúvio para a formação de canais. Este “comprimento crítico” depende do declive da superfície, velocidade de deflúvio, capacidade de infiltração e resistência do solo à erosão. Considerou ainda que, a resistência do solo à erosão é o mais importante fator envolvido no fenômeno da erosão e que, em períodos relativamente longos, exerce efeito dominante no desenvolvimento dos sistemas hidrográficos e suas bacias de drenagem.

Para Horton (1945), o padrão e a densidade de drenagem, ou ambos reunidos, não são suficientes para uma caracterização completa da rede hidrográfica de uma dada bacia de drenagem, uma vez que, com os mesmos números e comprimentos de rios, o padrão de drenagem pode ser dendrítico, retangular, paralelo ou radial; ou podem existir tipos semelhantes de padrão com densidades muito diferentes. Entretanto, podem ocorrer, também, combinações de ordens, números e comprimentos de rios que podem resultar na mesma densidade de drenagem.

Dentro deste contexto é que Horton (1945) propôs a expressão composição da rede de drenagem para indicar os números e comprimentos de rios nas

diferentes ordens de ramificação, independente do padrão. Considera que, a composição da rede possui alto grau de significância hidrológica, mas reconhece a importância do padrão de drenagem como indicador de controle geológico.

Baseando-se nas Leis fundamentais estabelecidas por Horton (1945), nas quais são relacionados o número e comprimento médio de rios às ordens de ramificação e da Lei de comprimento total de rios de Strahler (1957), que relaciona o comprimento total de segmentos de rios às ordens de ramificação, Maxwell (1955), Strahler (1957), França (1968) e Vasques Filho (1972) propuseram o ajuste, através de equações, desses parâmetros com as ordens de ramificação no sentido de facilitar interpretações, comparações ou diferenciações de solos.

Maxwell (1955) verificou uma regressão linear dos logaritmos dos números de rios de cada ordem (ordenadas) sobre as ordens de rios (abscissas), a qual, gera uma linha reta com muito pouca dispersão. A equação linear é a seguinte: $\log Nw = a - bw$, onde w é a ordem de segmentos de rios e Nw, o número de segmentos de rios de ordem w. Maxwell (1955) recomendou ainda, a equação: $Rb = anti\log b$, como a melhor expressão empírica da razão de ramificação, Rb.

A Lei dos números de rios de Horton (1945) expressa a relação entre o número de rios de cada ordem e a ordem de ramificação, em termos de uma série geométrica inversa, na qual a razão de ramificação é a base. Analogamente, a Lei dos comprimentos de rios do mesmo autor, expressa a relação entre os comprimentos médios de rios de cada ordem de ramificação, em termos de uma série geométrica direta, na qual o primeiro termo é o comprimento médio dos rios de 1ª ordem e cuja razão é a razão de comprimento médio.

Horton (1945) encontrou valores de razão de ramificação variando de 2,22 para bacias suavemente onduladas até 3,91 para bacias montanhosas ou altamente dissecadas.

Em um estudo realizado em algumas bacias hidrográficas tributárias do Rio Delaware, N.Y., Horton (1945) encontrou para a razão de comprimento médio, Rl, valores variando de 1,84 a 2,74, com valor médio de 2,3.

Strahler (1957) aplicou a lei dos números de rios de Horton para comprimentos totais de rios, expressando a relação entre o comprimento total de rios de uma

dada ordem de ramificação, em termos de uma série geométrica inversa, onde a razão de comprimento total é à base desta série.

O mesmo autor, relacionou os logaritmos dos comprimentos totais de rios às ordens de rios e obteve uma regressão exponencial, que pode ser expressa pelas equações: $\log Lw = \log a - b \log w$, e Lw = a w^{-b}, onde w é a ordem de segmentos de rios e Lw, a soma dos comprimentos de rios de ordem w.

Todavia, para a razão de ramificação, Strahler (1957) propôs a seguinte equação: $Rb = \log^{-1} b$.

Na equação determinada por Strahler (1957), a inclinação b da linha de regressão é o expoente em uma função exponencial relacionando as somas dos comprimentos de rios às ordens de rios, tendo esse autor encontrado o valor $b = -1{,}67$ para os dados combinados de seis bacias de 4ª ordem.

França (1968) para relacionar o número de rios às ordens de ramificação usou a seguinte equação: log Nw = a – bw.

Esse autor obteve para as bacias hidrográficas de 4ª ordem de ramificação representativas de Latossolo Vermelho – Amarelo textura média a equação: $\log Nw = 1{,}9533 - 0{,}5082\ w$ e obteve o valor médio calculado para a razão de ramificação igual a 3,22. Esse valor médio foi calculado pela seguinte equação: $Rb = \log^{-1} b$.

A equação que relaciona o comprimento de rios às ordens de ramificação utilizada por França (1968) foi a seguinte: log Lw = a - bw.

Esse autor obteve para Latossolo Vermelho Amarelo textura média a equação: $\log Lw = 1{,}0788 - 0{,}1709\ w$ e obteve o valor médio calculado para a razão de comprimento total igual a 1,48, através da expressão: Rlw = $\log^{-1}$ b.

França (1968) obteve para as bacias hidrográficas de 4ª ordem de ramificação representativas de Latossolo Vermelho – Amarelo textura média, a razão de comprimento entre comprimentos médios de segmentos de rios de uma ordem e os da ordem anterior o valor de $Rl = 2{,}17$, obtido pela expressão: $Rl = Rb/Rlw$.

Vasques Filho (1972) ajustou para os comprimentos médios de rios uma equação simples monologarítmica log (y) = a + bx e também verificou a validade da

equação: $Rl = \log^{-1} b$ para a razão de comprimentos médios (Rl). A forma assumida pela referida equação dos comprimentos médios de rios, para as bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação representativas da associação de solos:, séries “Quebra Dente + Tijuco Preto” (ARGISSOLOS, EMBRAPA, 1999), ocorrentes no Município de Piracicaba, foi a seguinte: Log Lm = - 1,22657 + 0,37983w e a razão de comprimentos médios (Rl) igual a 2,39. Verificou ainda que para a razão de comprimentos totais, a equação Rlw = antilog b também conduziu a resultados significativos.

Os resultados do estudo da composição da rede de drenagem pelos autores supracitados refletem a relação entre a infiltração e o deflúvio que é função da natureza e propriedades dos solos.

França (1968) aplicou a lei dos comprimentos totais de rios de Strahler (1957) e ajustou uma equação linear monologarítmica log y = a + bx, e verificou ainda que o antilogarítmo de b na equação pode ser tomado como equivalente à razão comprimentos totais (Rlw), ou seja, Rlw = antilog b (da equação).

Carvalho (1977) encontrou, para bacias hidrográficas de terceira ordem de ramificação, representativas de Terra Roxa Estruturada - TR (NITOSSOLOS VERMELHOS Eutroférricos textura argilosa/muito argilosa relevo suave ondulado-NVef, EMBRAPA, 1999) ocorrentes no Município de São Manuel, e solos Podzólicos Vermelho-Amarelos + Litossolos – PV + Li (ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos típicos textura média/argilosa relevo ondulado + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos textura média relevo forte ondulado – PVAd + RLe, EMBRAPA, 1999) ocorrentes no município de Piracicaba, os seguintes valores de razão de ramificação (Rb),razão de comprimento total (Rlw) e razão de comprimento médio (Rl), obtidos através do antilog b das equações (log y = a + bx): 2,82 e 4,67; 1,04 e 1,80; 2,65 e 2,53, respectivamente. De acordo com o autor, quanto maior a razão de ramificação mais ramificada é a rede de drenagem e menor é a relação infiltração/deflúvio; as razões de comprimento total e comprimento médio não se mostraram um dado consistente na diferenciação dos solos como a razão de ramificação, o que levou o autor a reconhecer que o comprimento de rios é mais suscetível a controles: geológicos, litológico e ou estrutural, do que o número de rios.

Segundo Carvalho et al. (1992) a rede de drenagem de bacias hidrográficas de terceira ordem de ramificação representativas de LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS e LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS + NEOSSOLOS LITÓLICOS (EMBRAPA, 1999) do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo de Picinguaba e, provenientes de produtos de alteração de granito e gnaisse, não obedece à Lei de Horton para comprimento médio de segmentos de rios em decorrência da imposição estrutural do material geológico subjacente.

Lueder (1959) afirmou que uma rede de drenagem bem desenvolvida implica na existência de materiais pouco permeáveis, enquanto que uma escassa rede de drenagem superficial é indicativa de alta infiltração e boa permeabilidade.

Horton (1945) propôs duas relações denominadas densidade de drenagem (Dd), como sendo o comprimento total de rios por unidade de área; e freqüência de rios (Fr), definida como o número de rios por unidade de área, com o intuito de expressar quantitativamente o desenvolvimento da rede de drenagem.

Segundo Ray (1963), a densidade de drenagem aumenta à medida que diminui a resistência à erosão, pois, num dado ambiente climático, relaciona-se principalmente com a resistência à erosão dos materiais. Segundo esse autor, rochas de textura fina tendem a apresentar drenagem de textura fina e os arenitos de granulação grosseira tendem a apresentar drenagem de textura grosseira. No entanto, França (1968) admitiu que ocorrem exceções em conseqüência da natureza e propriedades dos solos que se desenvolvem sobre essas rochas.

Para Horton (1945) e Strahler (1957), a densidade de drenagem e freqüência de rios variam com o tamanho da área de drenagem, não podendo ser diretamente comparáveis, através dessas duas relações, quando são consideradas as pequenas e grandes bacias.

Segundo Strahler (1957) para que se possa comparar as bacias hidrográficas, é indispensável que pertençam à mesma ordem de ramificação.

Para expressar o espaçamento entre canais de drenagem, em mapas topográficos com curvas de nível, Smith (1950) propôs uma relação, a qual denominou de razão de textura. Como os canais menores geralmente não são representados nos mapas topográficos, as suas localizações, em tais mapas, podem ser identificadas pelas inflexões das curvas de nível. Recomenda, nesse caso, que seja escolhida a curva de nível de maior número

de inflexões e que esse número seja dividido pelo perímetro da bacia, obtendo-se dessa maneira a razão de textura.

Considerando que os sistemas de drenagem podem ser melhor estudados em mapas básicos de drenagem obtidos pelo exame estereoscópico de fotografias aéreas, conforme recomendação de Howe (1960), Ray (1963) e Ricci & Petri (1965), França (1968) propôs a determinação da textura topográfica, substituindo-se o número de inflexões da curva de nível pelo número total de rios de 1ª ordem da bacia.

Smith (1950) propôs, para caracterizar a textura topográfica de uma dada área como um todo, o uso de um valor médio ponderado, levando em consideração o tamanho de cada bacia. Com base nesses valores, o mesmo autor classificou a textura topográfica em grosseira (abaixo de 4), média (de 4 a 10) e fina (acima de 10), quando o perímetro é expresso em milhas. França (1968) adaptou o perímetro para quilômetros e obteve, para a razão textura média os seguintes valores: abaixo de 2,5 (textura topográfica grosseira); 2,5 a 6,2 (textura média) e acima de 6,2 (textura fina).

De acordo com França (1968), quando aumenta a ordem de ramificação da rede de drenagem há também um aumento da área de drenagem e variação das características quantitativas do padrão: aumenta a razão de textura e diminuem a densidade de drenagem e a freqüência de rios, porque aumentando a área da bacia, o perímetro aumenta de um modo proporcionalmente menor.

Carvalho, (1977) estudando a rede de drenagem de bacias de 3ª ordem de ramificação de uma associação de Solos, Podzólicos Vermelho – Amarelos + Litossolos – PV + Li, que segundo EMBRAPA (1999) são classificados como: ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos típicos textura média/argilosa relevo ondulado + NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos textura média relevo forte ondulado (PVAd + RLe), provenientes de produtos de alteração de argilitos e folhelhos, obteve os seguintes valores médios de densidade de drenagem, freqüência e razão de textura: 3,94; 11,15 e 3,96, respectivamente.

Segundo Silva (2001) a razão de textura média não é sensível para diferenciar a classe de textura topográfica de solos com relevos pouco contrastantes.

O padrão de drenagem tem sido usado na bibliografia para expressar a maneira pela qual os cursos de água se arranjam ou se distribuem dentro de uma dada área de

drenagem. Carvalho (1977) constatou que mudanças nas características qualitativas do padrão de drenagem podem estar refletindo um controle litológico para solos rasos e um controle estrutural para solos desenvolvidos de rochas eruptivas básicas.

Parvis (1950) classificou seis padrões de drenagem básicos: dendrítico, treliça, radial, paralelo, anular e retangular. Utilizando algumas modificações destes seis padrões, classificou e descreveu trinta tipos ou modelos. Esse autor também se referiu à facilidade com que esses padrões de drenagem podem ser observados e analisados em fotografias aéreas e a sua avaliação significativa na fotointerpretação de solos e substratos rochosos, por refletirem as proporções de infiltração/deflúvio.

Strahler (1957) desenvolveu um método denominado semelhança geométrica e análise dimensional através de medidas de tamanho e parâmetros geométricos lineares que definem as bacias de drenagem. Esse método tem sido utilizado como auxiliar no processo de amostragem de bacias hidrográficas que tenham homogeneidade edafológica, comportamento hidrológico e características morfométricas semelhantes.

Carvalho et al. (2000) aplicando o método de semelhança geométrica e análise dimensional em bacias de 3ª ordem de ramificação como critério para cartografar solos, constataram que as bacias contidas integralmente numa única unidade de solo apresentavam maior similaridade geométrica.

Silva (2001) estudando a rede de drenagem de uma associação de solos com horizonte B textural e provenientes de mesmo material de origem, verificou que o teste de semelhança geométrica e análise dimensional, aplicado para 35 bacias de 3ª ordem de ramificação, foi sensível para discriminar solos com diferenças de profundidade, textura do horizonte B e relevo.

4.2 Relações entre Características da Rede de Drenagem, Relevo e Solos

As relações entre o desenvolvimento do relevo e a idade dos solos correspondem à história da erosão, sedimentação e a idade do solo em um determinado local. Se não existe erosão ou sedimentação marcante numa determinada área, por um longo período de tempo, relevo e solos antigos podem ser encontrados. Essas áreas, em geral, são velhos sedimentos ou velhos peneplanos, com grandes extensões e relevo plano ou ligeiramente

ondulado. Os solos mais jovens podem ser encontrados em sedimentos recentes, principalmente, nos lugares que têm sido marcadamente influenciados por erosões recentes. Se somente testemunhos de velhas formas de relevo são encontradas, tais como “inselbergs” ou pequenos “plateaux”, erosões recentes são particularmente importantes e solos jovens são encontrados. De maneira geral, os solos mais jovens podem ocorrer nas partes mais elevadas, os quais são mais freqüentemente influenciados por ciclos de desnudação mais recentes, Brasil (1960).

O relevo diz respeito às formas de terreno que compõem uma paisagem. Sua ação se reflete, principalmente sobre a dinâmica da água, quer no sentido vertical (infiltração), como lateral (run-off), assim como indiretamente sobre a temperatura e radiações, dentre outros. A influência do relevo sobre as propriedades do solo deve ser estudada somente em áreas geográficas restritas, isto para evitar as variações dos outros fatores de formação de solos, Demattê (1978).

Segundo Penteado (1968), os solos refletem um equilíbrio frágil entre relevo, clima e vegetação. As vertentes acompanham a evolução dos solos. Quando os fatores estão em equilíbrio, resulta também uma topossequência em equilíbrio, na qual os horizontes do solo apresentam quase a mesma relação de espessura desde o topo até a base da encosta, ocorrendo pequena diminuição do horizonte A no ponto de maior inflexão do declive (zona de maior transporte) e ligeiro aumento na base (zona de chegada dos sedimentos).

Tricard (1968) analisou as íntimas relações existentes entre a morfogênese, à luz do caráter dinâmico do relevo. Fauck (1972) afirmou que no decorrer da pedogênese, o nível dos solos desce gradativamente, por acomodação de horizontes e fenômenos de erosão dos horizontes superiores, mostrando que a pedogênese é uma causa da morfogênese; isto é, os solos modificando o relevo.

Os índices quantitativos: densidade de drenagem e freqüência de rios, refletindo a relação infiltração/deflúvio, mostraram-se inversamente proporcionais ao grau de evolução atingido pelos solos, Espíndola (1977).

Carvalho et al. (1995) verificaram a significância estatística de parâmetros da rede de drenagem e do relevo para discriminar os solos da Bacia do rio Santo Anastácio, no Oeste do Estado de são Paulo, através de amostras circulares de 10km^2, e concluíram que os valores médios de: densidade de drenagem (km rios/km^2), freqüência de

rios (nº de rios/km^2), razão de textura (nº rios/km), declividade média e comprimento médio de vertente, discriminaram os LATOSSOLOS VERMELHOS/LATOSSOLO VERMELHO-AMARELOS (LV/LA); LATOSSOLOS VERMELHOS Argissólicos (LV); ARGISSOLOS VERMELHOS/ARGISSOLOS VERMELHO - AMARELOS (PV/PA); ARGISSOLOS VERMELHOS/ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS + NEOSSOLOS LITÓLICOS (PV/PA + R), mas não discriminaram o PV/PA do PV/PA + R.

Tomando por base bacias hidrográficas de terceira ordem de ramificação, Strahler (1952) propôs a construção de curvas hipsométricas com a finalidade de representar graficamente a distribuição do material existente no interior das bacias, tomando-se como base uma unidade geométrica de referência. Tal interpretação permite inferir, comparativamente, a quantidade de material erodido e removido para fora ou para dentro da própria bacia.

Para efetuar análises comparativas do estágio do relevo, Strahler (1952) utilizou valores relativos de área e de altitude, com a finalidade de construir graficamente as curvas hipsométricas. A interpretação da forma das curvas e do valor de suas integrais foi conduzida para definir os estágios de relevo que o autor denominou de juventude, maturidade e velhice. A juventude corresponde a um desequilíbrio onde a erosão é maior que a sedimentação e a curva assume a forma côncava na parte superior e convexa nas partes central e final. A maturidade representa o estágio de equilíbrio, onde a erosão e a sedimentação se igualam e a curva passa pela parte central do diagrama, apresentando forma côncava na primeira metade e convexa na segunda. A velhice corresponde a um estágio onde a acumulação é facilitada pela diminuição do gradiente e a erosão é diminuída. As curvas apresentam-se fortemente côncavas com baixos valores de integral. Este estágio é temporário, sendo caracterizado pela presença de testemunhos de erosão. Pelo fato do processo ser dinâmico, atingem esta fase, primeiramente, os rios de ordem mais elevada, estendendo-se gradativamente em direção à montante. Quando ocorre uma retomada de erosão, a curva volta para posições mais elevadas no diagrama.

A construção de curvas hipsométricas, segundo Strahler (1952), tem por finalidade permitir representar graficamente a distribuição do material, desde as partes mais baixas até as mais altas, tomando-se como base uma unidade geométrica de referência. A unidade geométrica de referência consiste em um sólido limitado, lateralmente, pela projeção

vertical do perímetro da bacia, no topo e na base, por planos paralelos, passando através do cume e da desembocadura, respectivamente.

Segundo Piedade (1980), o valor médio da integral hipsométrica associado à forma das curvas representadas no diagrama, com a presença de testemunhos de erosão, sugere um estágio jovem de relevo (retomada de erosão), para uma área com solos mapeados como Latossolos Vermelho-Amarelo-fase arenoso (LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS textura média, EMBRAPA, 1999) e um estágio de relevo mais maduro para uma área mapeada como Regossolo "intergrade" para Solo Podzólico Vermelho-Amarelo e "intergrade" para Latossolo Vermelho-Amarelo (NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS Órticos argissólicos e NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS Órticos latossólicos, EMBRAPA, 1999).

Vieira (1978) considerou que na atuação de processos morfogenéticos, há muitos pontos em que se assemelham bacias hidrográficas e voçorocas, admitindo que estas correspondem a sub-sistemas abertos, não isolados, incrustados no interior do sistema maior que é a bacia e que inclusive, condicionam sua evolução. Esses resultados foram utilizados para estudos morfométricos das voçorocas de Franca (SP), conceitos e índices definidos na bibliografia para a análise de bacias hidrográficas.

As características dos canais de cabeceira, gradiente dos canais, forma dos declives do perfil e declividades hipsométricas são, segundo Strahler (1952), informações morfológicas úteis para comparar semelhanças ou diferenças entre regiões.

Strahler (1952) afirmou que bacias hidrográficas de 3ª ou 4ª ordem de ramificação, com relevo suave, em estágio de maturidade, gradientes suaves de rios e baixa densidade de drenagem tendem a resultar integrais hipsométricas relativamente altas; enquanto que áreas de relevo acidentado e alta densidade de drenagem tendem a resultar integrais relativamente baixas.

Vieira (1978) considerou que a análise morfométrica não se completa sem o estudo de declividade, para a melhor interpretação da intensidade de processos erosivos.

Carvalho et al. (1978) estudando a inter-relação solo, relevo e rede de drenagem em três áreas fisiográficas distintas, numa região entre Conchas e Anhembi (SP), tomaram como principal critério analítico a evolução das "cabeceiras de erosão". No decênio em estudo, observaram ser muito ativa a evolução das "cabeceiras de erosão", apresentando maior número de canais novos na área onde predominavam Litossolos (NEOSSOLOS

LITÓLICOS, EMBRAPA, 1999), sob relevo fortemente ondulado. A evolução mostrou-se, também, expressiva na área constituída de Regossolos arenosos (NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS, EMBRAPA, 1999) onde o relevo se apresenta suavemente ondulado. Já para a terceira área, onde predominavam Solos Podzólicos (ARGISSOLOS, EMBRAPA, 1999) em associação com Litossolos (NEOSSOLOS LITÓLICOS, EMBRAPA, 1999), sob relevo ondulado, a susceptibilidade à erosão mostrou-se menos intensa.

Carvalho (1981) encontrou para LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS textura média e Solos Litólicos substrato arenítico-basáltico (NEOSSOLOS LITÓLICOS fase substrato arenítico – basáltico, EMBRAPA, 1999) os seguintes valores para o material erodido, de pequenas bacias hidrográficas: 0,208 e 0,093. Esses valores refletem o relevo, as características do solo e uso com pastagem nos Latossolos e mata nos Neossolos Litólicos.

Azevedo (1999), estudando a rede de drenagem e o relevo em bacias hidrográficas de 3ª ordem, de ramificação em três municípios do Oeste do Estado de São Paulo, concluiu que a densidade de drenagem e freqüência de rios refletem a natureza e propriedades dos solos, indicando que a relação infiltração/deflúvio é maior para o LATOSSOLO e menor para o Solo Podzólico (ARGISSOLO, EMBRAPA, 1999) e que o uso com pastagem há mais de vinte anos, aliado a interações diferentes dos fatores de erosão conduziu a perdas por erosão comparativamente semelhantes para os solos geneticamente diferentes.

A cobertura vegetal tem grande influência no que se refere aos processos de escoamento, pois atua no regime das águas, nas características do solo, nos declives e no mecanismo hidrológico, retardando e desviando o escoamento superficial, indo facilitar a infiltração da água nas camadas inferiores do solo, diminuindo o caudal de escoamento superficial e consequentemente, a erosão Vieira (1978).

A erosão pode, de início, estar refletindo o mau uso do solo ou, depois de um certo tempo, as condições intrínsecas da área, como a geologia, a geomorfologia, o clima e o regime hidrológico das bacias, segundo afirmaram Iwasa & Prandini (1980).

Segundo Bertoni & Lombardi (1985), "o conhecimento da intensidade esperada de perdas de solo para cada uma das alternativas de sistemas de cultivo e manejo para uma área qualquer pode ser obtido pela equação de perdas de solo. Quando a previsão

dessas perdas pode ser comparada com a tolerância de perdas de solo para aquela área, é possível determinar as combinações de cultivo e manejo a adotar, nas quais a previsão de perdas de solo é menor do que a tolerância, proporcionando, portanto, uma verificação satisfatória do controle da erosão".

A topografia do terreno, representada pela declividade e pelo comprimento dos lançantes exerce acentuada influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade de material em suspensão arrastado pela água dependem da velocidade com que ela escorre, e essa velocidade é resultante do comportamento do lançante e do grau de declividade do terreno (Bertoni & Lombardi, 1985).

Ayres (1936) apresentou alguns princípios de hidráulica e teoricamente explica as relações entre velocidade da água e o seu poder erosivo, afirmando que: 1) a velocidade da água varia com a raiz quadrada da distância vertical que ela percorre, e a sua energia cinética, de acordo com o quadrado da velocidade, sendo a energia cinética simétrica à sua capacidade erosiva; assim, se o declive do terreno aumenta quatro vezes, a velocidade de escorrimento da água aumenta duas vezes e a capacidade erosiva quadruplica; 2) a quantidade de material que pode ser arrastado varia com a quinta potência de velocidade de escorrimento; 3) o tamanho das partículas arrastadas varia com a sexta potência de velocidade de escorrimento; assim, duplicando a velocidade de escorrimento, a quantidade de material que pode ser transportado aumenta 32 vezes, e o tamanho das partículas que podem ser transportadas aumenta 64 vezes.

O efeito do comprimento de rampa sobre as perdas por erosão foi comprovado por Bertoni et al. (1972).

Segundo Garcia & Piedade (1978), curva de nível é uma linha sinuosa que liga pontos do terreno de mesma cota; esta linha é dada pela intersecção de planos horizontais com a superfície do terreno. As curvas de nível de uma planta são numeradas com certas convenções de modo a facilitar sua interpretação; a representação gráfica de uma depressão e uma elevação é semelhante, diferindo, no entanto, quanto à numeração. Os tipos básicos de vertentes são: plana ou uniforme côncava e convexa. A vertente plana apresenta declividade constante e curvas de nível igualmente espaçadas; a vertente côncava diminui à medida que a encosta desce, com curvas de nível próximas no cume e afastadas na parte baixa;

a vertente convexa aumenta à medida que a encosta desce, com curvas de nível espaçadas no cume e próximas na parte baixa.

4.3 Dimensão Fractal

Na abordagem de um problema científico, o uso de novos conhecimentos não significa, necessariamente, o uso de conhecimentos construídos recentemente, mas de conhecimentos incorporáveis, mesmo que por analogia, num novo sistema de relações em que se recoloca uma questão (D'Ágostini, 1999).

O termo "fractal" foi introduzido na década de 70 pelo matemático Benoit Mandelbrot, para designar objetos e estruturas complexas dotadas de propriedade de auto-similaridade (Chaves, 1989). Estruturas auto-similares apresentam detalhes, ramificações, poros ou rugosidades, em certa faixa de escala de comprimento, cuja forma é a mesma em diferentes escalas. Assim, se parte da estrutura for ampliada terá a mesma forma do todo (Mandelbrot, 1983).

A análise quantitativa de bacias hidrográficas e respectivas redes de drenagem, aplicáveis na identificação de solos com base em fotografias aéreas têm sido objeto de estudo, comprovado pela vasta literatura a respeito. O precursor deste estudo no Brasil foi França (1968) que chegou a conclusão que a composição e as características da rede de drenagem variam em primeiro lugar, com a natureza do solo e, depois, com a posição topográfica e com a natureza e profundidade do substrato rochoso.

Mandelbrot (1977) introduziu um novo conceito denominado teoria dos fractais e investigou a aplicabilidade da geometria fractal em sistemas naturais e, em especial, à hidrologia, introduzindo uma nova característica geométrica, a dimensão fractal, no estudo das redes de drenagem de bacias hidrográficas, mas não se preocupando em relacionar os sistemas hidrológicos com as características ambientais onde se desenvolviam.

A análise fractal tem sido empregada para interpretar processos temporais, ou como um meio complementar ou quando os gráficos são irregulares.

Segundo Mandelbrot (1982) a dimensão fractal se presta à caracterizar fenômenos naturais, irregulares, com maior precisão do que as análises convencionais, porque permite uma análise com menores distorções da realidade. Assim, a aplicabilidade dessa

análise em fenômenos naturais, em particular, à hidrologia possibilitou a introdução da dimensão fractal no estudo das redes de drenagem de bacias hidrográficas.

Desde as primeiras publicações sobre a dimensão fractal pelo polonês Benoit Mandelbrot em 1975, o mundo científico tem recebido fortes influências desse novo campo de pesquisas e tecnologia. Mandelbrot (1982) reforçou a característica fractal da natureza, sendo que muitos trabalhos com solos surgiram desde então, reforçando a característica fractal destes. Entretanto, embora os avanços na área de solos tenham sido rápidos, foram encontrados valores discutíveis de dimensão fractal como no caso de Perfect & Kay (1991) que apresentaram resultados maiores que 3, portanto não representando a dimensão fractal correspondente ao volume, que deveria estar ni intervalo entre 2 e 3. Estes resultados, questionados pela Física, foram passíveis de revisões pelos mesmos autores, quando trabalharam para caracterizar a distribuição do tamanho e número de partículas em várias amostras de solo. Contudo, valores de dimensão fractal entre 0,67 e 3,92 foram encontrados (Perfect et al., 1992) aumentando ainda mais a discussão em nível mundial.

Assim, numa frente paralela de pesquisa, Rieu & Sposito (1991) obtiveram resultados mais expressivos para vários tipos de solos tendo como parâmetros a densidade e a massa, apresentando valores de dimensão fractal 2,88 para solos com menos argila e 2,95 para solos com mais argila. Nesta mesma linha, Young & Crawford (1991) examinaram a teoria dos Fractais em relação à estrutura do solo, e verificaram que a dimensão fractal variou em função do manejo correspondente a diferentes tipos de cultura. Neste trabalho, os valores de dimensão fractal variaram entre 2,75 a 2,93, seguindo a recomendação de que pode-se quantificar a heterogeneidade destes pela dimensão fractal. Conjuntamente com a caracterização fractal da estrutura do solo, existe a hipótese de um comportamento relacionando dimensão fractal da estrutura e o tempo de infiltração de líquidos neste meio.

Linhas de pesquisas próximas da relação proposta acima já estão sendo estudadas, como é o caso de Guerrini & Swartzendruber (1993; 1994), onde os autores aplicaram a dimensão fractal no movimento da água no solo. Nestes trabalhos, a técnica empregada foi a da atenuação por radiação gama com base na equação reduzida $\chi = \lambda(\omega)t^{n}$, onde ao expoente de difusão de Hurst "n" é atribuído ter propriedade de dimensão fractal. Assim, D ou a dimensão fractal do movimento da água no solo é *D=2-n*. Os valores

encontrados para o movimento de água no solo por esse método têm valores entre 1 e 2, portanto, está sendo analisado em 2 dimensões, ou movimento vertical ou horizontal.

Nos últimos anos, houve grande interesse na aplicação da teoria fractal em diversos ramos da ciência (Vicsek, 1992; Harrison, 1992; Berton & La Pointe, 1995).

A maior parte dos fenômenos naturais apresenta comportamento não-linear, capaz de gerar padrões bastante complexos para serem adequadamente descritos pela geometria euclidiana. Uma alternativa que minimiza as limitações presentes na descrição clássica (euclidiana) dos fenômenos irregulares da natureza é a geometria fractal, que, ao contrário da euclidiana, não se baseia em objetos regulares, suaves e diferenciáveis, Guzman et al. (1993). Cabe ressaltar que os conjuntos na geometria euclidiana são descritos por equações algébricas, enquanto a geometria fractal é descrita por algoritmos recursivos. Conhecendo o "motivo" gerador de determinada estrutura, pode-se, a partir daí, obter a estrutura completa (Vicsek, 1992).

Acredita-se que o aspecto mais básico de um objeto fractal seja a sua dimensão fractal. Um modo simples e intuitivo de associar uma dimensão a determinado conjunto é contar o número mínimo $N(\varepsilon)$ de quadriculas, de lado (ε), necessários para cobrir completamente o conjunto. Esse número obedece a uma lei de potência: $N(\varepsilon) = A.\varepsilon^{-D}$, que define e permite calcular o expoente D, que é a dimensão de cobertura ou mais simplesmente, a dimensão fractal (Mandelbrot, 1983).

A dimensão fractal (D) pode apresentar, ao contrário da dimensão euclidiana (d), valores fracionários que dependem do sistema: $0 < D < 1$, para uma curva; $1 < D < 2$, para superfície; e $2 < D < 3$, para um "sólido". Esse valor é uma medida de proporção do espaço realmente ocupado por um sistema desordenado, podendo refletir a conformação das partículas que o constituem (Harrison, 1992).

Normalmente impressiona-se pelos padrões e formas que a natureza emprega, e em alguns casos essas formas e padrões estão muito organizados. O homem sempre tentou entender os padrões e formas achadas na natureza: galáxias, nuvens, flocos de neve, litorais, folhas, florestas, padrões em pele e em borboletas, formas, formas de cristais,

moléculas e macromoléculas (por exemplo, polímero sintético e proteínas), formas de células biológicas e vírus (Mandelbrot, 1982).

Segundo Mandelbrot (1982) nuvens não são esferas, montanhas não são cones, linhas costeiras não são círculos e casca não é lisa, nem faz a luz viajar em linha reta. Há algumas décadas atrás, com o desenvolvimento de computadores, surgiu a possibilidade de se encontrar as leis geométricas que a natureza tem usado nos processos e nas formas. Para caracterizar as estruturas geométricas denominadas irregulares, o autor desenvolveu e introduziu um tipo novo de geometria, geometria de fractal (diferente de geometria Euclidiana). Para isto foi mostrado que muitas estruturas que normalmente são descritas de fato como irregular, fortuito, ou caótico, naturalmente têm formas que podem ser medidas e podem ser categorizadas. Podem ser descritas de muitas formas e padrões achados em vida cotidiana, em base de considerações geométricas um pouco mais simples. De fato, geometria fractal pode ser considerada um modo novo de registro da natureza.

Mandelbrot cunhou a palavra fractal ao fractus de adjetivo latino (frangere de verbo latino) referindo-se a quebrar, isto é, criar fragmentos irregulares.

A dimensão fractal integrada à análise geométrica, por exemplo, podem descrever o movimento irregular de uma partícula de pó no ar (movimento denominado Browniano), conduzindo à descoberta da natureza dessas formas e padrões, aparentemente caóticos.

Estes desenvolvimentos deram lugar a uma literatura muito extensa. Existem muitos livros de ensino que descrevem os vários níveis da proposta elaborada, que se desenvolveu sobre a teoria dos fractais, aplicados em vários sistemas naturais e em tecnologia.

O conceito de fractais motivou a imaginação de cientistas em muitos campos e documentos que discutem Fractais em contextos variados. Os livros de Mandelbrot são notáveis de vários modos. Eles são disciplinares, discute árvores, rios, pulmões, níveis de água, turbulência, economia e muitos outros tópicos. Ele amarra todos esses campos junto com os conceitos geométricos deles. As idéias dele revelarão perspicácia adicional na geometria da natureza.

Spadotto & Guerrini (1996) definiram que a fórmula prática para a determinação da dimensão fractal da estrutura de solos e de outros materiais porosos é

$D = \log V_2 / \log \sqrt[3]{M}$, onde V_2 é o volume compactado e M é a massa correspondente a este volume. Em outros casos, V_2 e M podem compreender outras unidades de medida, ficando, portanto, definidos genericamente como quantidades. Este método foi denominado de MC-D por permitir a determinação da dimensão fractal através de cubetas de acrílico transparente com espessura da parede de 0,3 cm e medidas internas de 7 cm de altura por 2,5 cm de cada lado.

Spadotto & Guerrini (1996) e Spadotto & Seraphim (1998) mostraram que a partir do MC-D é possível determinar a dimensão fractal de partículas minerais, relacionando numa mesma metodologia trabalhos em 2D e 3D. Este trabalho expande os horizontes deste método prático para as áreas médicas e biológicas, dentre outras.

Spadotto et al. (1996) prova que a fórmula *Spadotto* pode ser usada com segurança para determinar as dimensões inteiras e fractais, com base em 1D, 2D e 3D. No caso de trabalhos relacionados com o Box-Counting, esta mesma fórmula mostrou-se eficiente, resguardando os já discutidos por outros autores problemas de inserção de figuras nas malhas.

Variações temporais naturais como metabolismo animal e vegetal, infiltração de água em materiais porosos, reações químicas e variação de temperatura ambiental, dentre outros, são tidos como fenômenos fractais Mandelbrot (1982). Apesar desta constatação, que foi corroborada por outros autores, os padrões fractais como auto-similaridade e complexidade infinita não são bem definidos por uma análise superficial. Para melhor compreender os fenômenos fractais, além da análise conceitual de dimensão fractal (D), foram desenvolvidos métodos para determinar o valor de D. Um desses métodos é o MC-D e que determina a dimensão fractal em materiais porosos tendo como referência a terceira dimensão, e um outro é o da contagem de caixas. Este último insere malhas com tamanhos diferentes sobre figuras (gráficos ou imagens), analisa estatisticamente e por ajuste de curva apresenta um valor médio para cada tamanho de caixa. Entretanto, existe um método prático e que serve para determinar a dimensão fractal em muitas figuras, que é o SPA-BOX.

Mandelbrot (1977) foi o precursor na utilização de fractais em hidrologia, visando estender o uso da teoria dos fractais e mostrar o seu uso em vários sistemas naturais. O autor, através de exemplo, mostrou a relação de dependência empírica

entre o comprimento do rio principal e a área da bacia hidrográfica, o que poderá resultar na natureza fractal do rio. A partir de então estudos têm sido realizados na investigação da estrutura geométrica de sistemas de rios, contribuindo para que a dimensão fractal seja considerada como uma nova característica das redes de drenagem.

Tarborton et al. (1988) citado por Gomes (1997) estudando a natureza fractal das redes de drenagem, utilizaram métodos gráficos (Método de Richardson, Método de Box-Counting e Método da Distribuição da Probabilidade de Excedência do Comprimento de Canais), os quais, quando aplicados confirmaram a natureza fractal das redes de drenagem, o que possibilitou a determinação da dimensão fractal.

Nikora (1991) citado por Gomes (1997) avaliando o comportamento fractal das bacias hidrográficas, considerou a possibilidade de auto-similaridade das redes de drenagem. Segundo esta análise, o autor mostrou que as bacias hidrográficas são objetos fractais.

Gomes (1997) estudando as redes de drenagem de bacias hidrográficas, de diferentes ordens, classificadas segundo Strahler (1957), situadas no estado de São Paulo, aplicou significativos métodos para a determinação de diversos valores de dimensão fractal. Dentre esses, destaca-se os métodos gráficos (Método de Richardson, Método de Box-Counting e Método da Distribuição da Probabilidade de Excedência do Comprimento de Canais). As bacias hidrográficas estudadas foram as seguintes: Bacia do Ribeirão do Palmital (4^a ordem), Bacia do Ribeirão Pirapitingui (4^a ordem) e Bacia do Ribeirão do Feijão (3^a ordem).

Os valores de dimensão fractal obtidos segundo Gomes (1997), para as respectivas bacias hidrográficas, utilizando-se os métodos citados são os seguintes: Richardson (1,97; 1,98 e 1,78); Box-Counting (1,42; 1,60 e 1,45) e Distribuição da Probabilidade de Excedência do Comprimento de Canais (1,97; 1,95 e 1,83).

Gomes (1997) concluiu que os valores das dimensões fractais obtidos para as Bacias do Ribeirão do Palmital, Bacia do Ribeirão do Pirapitingui e Bacia do Ribeirão do Feijão, quando comparados com aqueles encontrados por Tarboton et al. (1988), sugerem que essas bacias podem ser vistas como objetos fractais; e que os valores das dimensões fractais D são afetadas pelas restrições locais das redes de drenagem.

Segundo Azevedo et al. (2000) o teste de médias de Tukey (5%) aplicado a dimensão fractal obtida para bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação, representativas de Argissolos Vermelhos e Latossolos Vermelhos, não mostrou significância estatística, provavelmente devido ao uso desses solos com pastagem há mais de vinte anos e ao material de origem ser produto de alteração de arenitos. Os autores concluíram que: a análise fractal foi sensível para refletir o uso dos solos com pastagem e avaliar conjuntamente a composição e o padrão da rede de drenagem.

4.3.1 Auto-similaridade e dimensão

A curva de Von Kock é um dos conceitos centrais da Geometria fractal**.** Ela está intimamente ligada à noção intuitiva de dimensão.

Segundo Peitgen et al. (1988) Um objeto normalmente considerado com uma dimensão, um segmento de reta, por exemplo, também possui uma propriedade de escala similar. Ela pode ser dividida em N partes idênticas, cada uma delas é representada sob a escala de razão $r = \frac{1}{N}$ do inteiro. Similarmente um objeto de duas dimensões, como uma área quadrada de um plano pode ser dividida em N partes auto-similares. Cada qual representada sob a escala de razão $r = \frac{1}{\sqrt{N}}$ ou $r = \frac{1}{N^{1/2}}$. Um objeto de três dimensões como um cubo sólido pode ser dividido em N cubinhos cada qual representado sob a escala por uma razão $r = \frac{1}{\sqrt[3]{N}}$ ou $r = \frac{1}{N^{1/3}}$. Com auto-similaridade a generalização para a dimensão fractal está caracterizada (determinada). A D – Dimensão auto-similar de um objeto pode ser dividida em N cópias menores dela mesma cada qual é representada por um fator r onde $r = \frac{1}{\sqrt[D]{N}}$ ou $N = \frac{1}{r^D}$ (1). Por outro lado, atribuindo a um objeto auto-similar de N partes escalonado por uma razão r parte do todo, a sua dimensão fractal ou similaridade é dada por: $D = \frac{\log N}{\log\left(1/r\right)}$ (2).

O desenvolvimento dessas equações (1) e (2) não é registrado na literatura e assim se faz necessário para melhor compreensão de suas aplicações.

$$1)\ r=\frac{1}{\sqrt[D]{N}}\Rightarrow\ r=\frac{1}{N^{1/D}}\ \Rightarrow\ (r)^D=\left(\frac{1}{N^{1/D}}\right)^D\Rightarrow\ (r)^D=\frac{(1)^D}{(N)^{D/D}}\ \Rightarrow\ (r)^D=\frac{1}{N}\Rightarrow\ N=\frac{1}{r^D}$$

$$2)\ N=\frac{1}{r^D}\Rightarrow N\,r^D=1\Rightarrow\ \left(N\,r^D\right)^{1/D}=\ (1)^{1/D}\Rightarrow N^{1/D}\,r^{D/D}=1\Rightarrow N^{1/D}\,(r)^1=1\ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N^{1/D}=\frac{1}{r}\Rightarrow\log N^{1/D}=\log\left(\frac{1}{r}\right)\Rightarrow\frac{1}{D}\ \log N=\log\left(\frac{1}{r}\right)\Rightarrow\log N=D\log\left(\frac{1}{r}\right)\Rightarrow D=\frac{\log N}{\log(1/r)}$$

A dimensão fractal, diferente da mais familiar noção da dimensão euclidiana, não tem necessidade de ser inteira. Algum segmento da curva de Von Kock é composto por 4 segmentos cada qual é escalonado por um fator inferior de $1/3$ de seu gerador. Sua dimensão fractal é $D=\frac{\log(4)}{\log\left(1/1/3\right)}=\frac{\log(4)}{\log(3)}$ ou aproximadamente $1{,}2618$, esta dimensão fracionária, maior que 1 porém menor que 2, reflete a não usual propriedade da curva. De certa forma ela preenche mais o espaço do que uma simples reta (D=1).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

Serviram de base para o presente estudo cinco bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação, pertencentes ao sistema hidrográfico da Bacia do Rio Santo Anastácio, que deságua no Rio Paraná, e localizadas nos municípios de Presidente Bernardes, Santo Anastácio e Marabá Paulista, Figura 1.

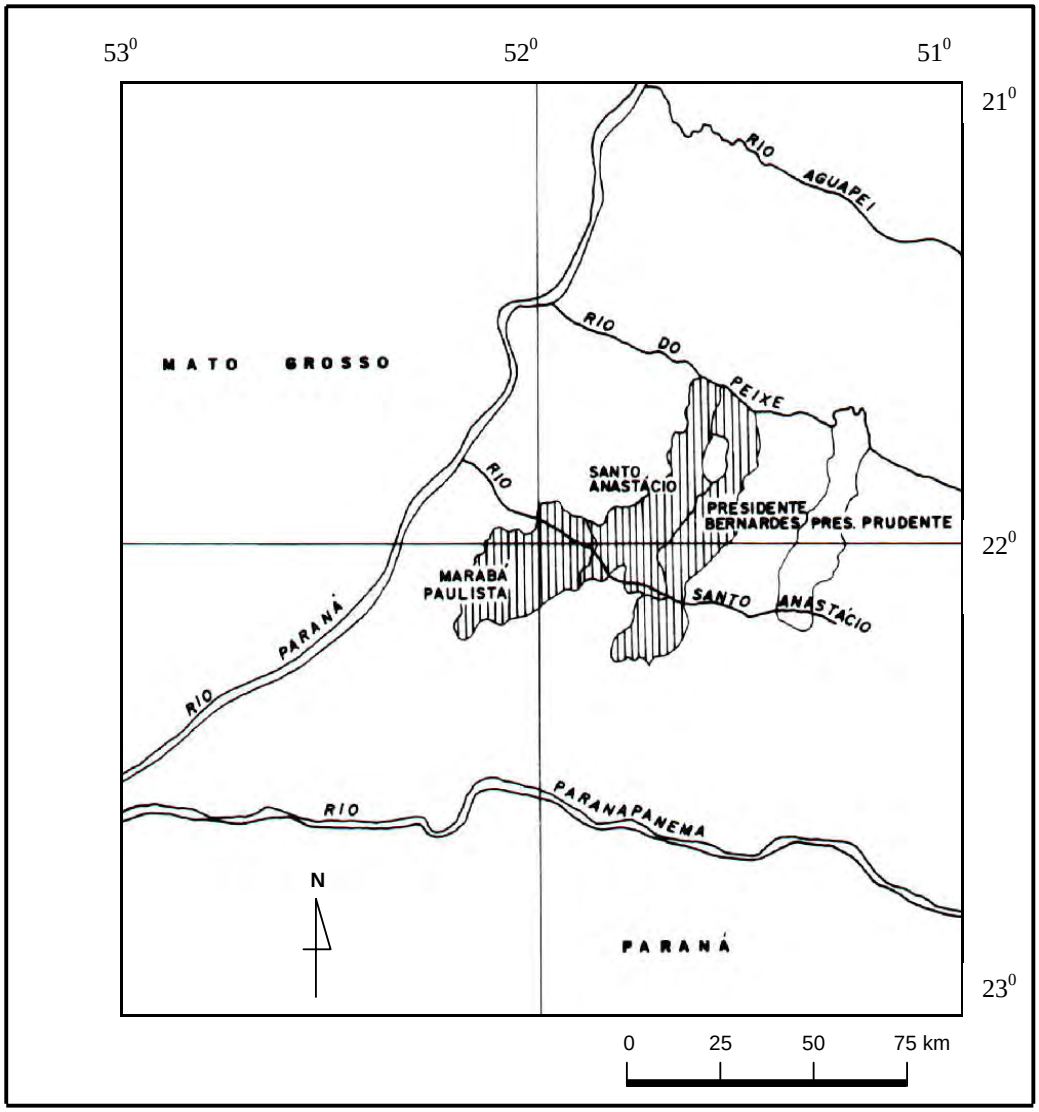
5.1.1 Descrição geral da área

As áreas estudadas estão compreendidas entre as seguintes coordenadas geográficas: 21º 49' 07" a 22º 16'54"de latitude S e 51º 29'27"a 52º 06'35"de longitude W Grw.

De acordo com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981a) a área, no oeste do Estado de São Paulo, encontra-se localizada na província geomorfológica denominada Planalto Ocidental Paulista.

Os terrenos da área estão assentados predominantemente sobre arenitos do Grupo Bauru – Formação Adamantina do Cretáceo Superior, ocorrendo também nas baixadas planas e geralmente úmidas, deposições do Cenozóico. A Formação Adamantina é constituída de depósitos fluviais com predominância de arenitos finos a muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltitos arenosos e

argilosos, ocorrendo em bancos maciços. Como estruturas sedimentares, apresenta estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno e grande porte (IPT, 1981b).



FONTE: BORGES, L. M. F. (1997)

Figura 1. Localização da área de estudo - municípios de Presidente Bernardes, Santo Anastácio e Marabá Paulista no Oeste do Estado de São Paulo (esboço das áreas dos municípios).

O clima da área segundo a classificação climática de Köppen é do tipo Aw (Carvalho et al.,1997, 2002), clima tropical quente e úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, onde a temperatura do mês mais quente é superior a 22^{o}C e a do mês mais frio é superior a 18^{o}C.

De acordo com os balanços hídricos realizados pelos autores referentes a Presidente Bernardes (Posto C8 – 026, período 1954-1990), Santo Anastácio (Posto C8 – 009, período 1950-1990) e Marabá Paulista (Posto D8 – 035, período 1971-1990), a temperatura e a precipitação média anual, são 22,1 ^{o}C e 1233mm; 21,9 ^{o}C e 1238mm; 21,8^{o}C e 1292mm, respectivamente. Em Presidente Bernardes, no período analisado, ocorreu excedente hídrico anual de 147mm de dezembro a março e deficiência hídrica anual de 17mm de junho a setembro. Nos meses de outubro a março concentrou-se 73% das precipitações. Em Santo Anastácio, no período analisado, ocorreu excedente hídrico anual de 171mm de dezembro a fevereiro e deficiência hídrica anual de 7mm nos meses de agosto e setembro. Nos meses de outubro a março concentrou-se 72% das precipitações. Em Marabá Paulista, no período analisado, ocorreu excedente hídrico anual de 211mm de outubro a fevereiro e nos meses de abril, maio e junho; e não apresentou deficiência hídrica. Nos meses de outubro a março concentrou-se 67% das precipitações.

O clima da região sofre influência de massas de ar Tropicais e Polares, com dominância da massa de ar Tropical Marítima e assim, as características climáticas analisadas convergem para a conclusão que ocorre apenas um tipo climático regional, Aw, tropical quente e úmido, porém perturbado pela circulação atmosférica regional. A referida região está localizada em uma faixa de transição climática, entre as zonas: tropical e extratropical; o que lhe confere um caráter de transição caracterizado pela variabilidade pluviométrica (Monteiro, 1973), com flutuações dos totais de chuvas provocadas pelas características geográficas locais, explicadas por vetores espaciais (San’tanna Neto & Barrios, 1992).

Antigas áreas ocupadas por densas florestas tropicais, no Oeste do Estado de São Paulo sofreram um processo de devastação em conseqüência do uso agrícola e pastoril, principalmente a partir da segunda década do século XX; atualmente, remanescentes da vegetação natural ocorrem em pequenos maciços isolados (Sarquis, 1996).

Os principais tipos de vegetação primária têm sido usados, desde a década de 60, como critério de fases de unidades de mapeamento adotadas em levantamentos pedológicos de média e pequena escala no Brasil, com o objetivo de suprir insuficiências de dados referentes às condições térmicas e hídricas do solo. Os tipos de vegetação, adotados para este fim, decorrem de condicionantes climáticos e/ou edáficos imperantes, os quais influenciam as variedades de formações fitogeográficas e regulam seu comportamento fisionômico-fisiológico (Camargo et al., 1987). Os principais tipos de vegetação primária reconhecidos como de interesse para os fins específicos de distinção de fases de unidades de mapeamento, visando a indicações de condições pedoclimáticas e subsidiariamente de oligotrofia ou eutrofia dos solos, são apresentadas em Lemos & Santos (1996) e EMBRAPA (1999).

De acordo com Carvalho et al. (1997, 2002) os remanescentes da vegetação natural permitiram reconhecer na área a floresta tropical subperenifólia e subcaducifólia. O tipo de vegetação subperenifólia, segundo os autores e Camargo et al. (1986), correlacionado com os regimes de temperatura e umidade do solo (EUA, 1975), provavelmente indica regime de temperatura epitérmico (temperatura média anual do solo, a 50 cm de profundidade, igual ou superior a 22^{o} C, e com diferença entre a média de temperatura do solo no verão e no inverno superior a 5^{o} C) e regime de umidade údico (o solo fica menos de 90 dias cumulativos, por ano sem água disponível às plantas até 50 cm de profundidade); a floresta tropical subcaducifólia indica regime de temperatura hipertérmico e regime de umidade ústico (o solo fica mais de 90 dias cumulativos sem água disponível às plantas até 50cm de profundidade).

As fases de relevo também são utilizadas para subdivisão ainda mais homogênea das classes de solos. Elas qualificam condições de declividade, comprimento de encostas e configuração superficial dos terrenos, que afetam as formas de modelado (formas topográficas) de áreas de ocorrência das unidades de solo. As fases de relevo são empregadas para prover informação sobre praticabilidade de emprego de equipamentos agrícolas; principalmente os mecanizados e facilitar inferências sobre suscetibilidade dos solos à erosão (Lemos & Santos, 1996; EMBRAPA, 1999). O relevo regional característico dos solos da área estudada é ondulado com topografia pouco movimentada, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8 a 20% (Quadro 1).

Quadro 1 – Classificação e principais características do solo das bacias hidrográficas estudadas segundo Carvalho et al. (l997*; 2002**)

Bacias	Município		Classificação
1	Marabá Paulista	*PEe3	Podzólico Vermelho Escuro Abrúptico Eutrófico Tb A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado.
		**PVe1	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrúptico A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado. Typic Rhodudalfs (Estados Unidos, 1994).
2 e 3	Presidente Bernardes	*PEe2	Podzólico Vermelho Escuro Abrúptico Eutrófico Tb A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado.
		**PVe2	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrúptico A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado. Typic Rhodustalfs (Estados Unidos, 1994).
4 e 5	Santo Anastácio	*PVe4	Podzólico Vermelho-Amarelo Abrúptico Eutrófico Tb A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado.
		**PVe1	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrúptico A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado. Typic Rhodudalfs (Estados Unidos, 1994).

Principais características	
Geologia	– Grupo Bauru – Formação Adamantina.
Cronologia	– Cretáceo Superior
Litologia	– Arenito.
Tipo climático	– Aw (Köppen)
Relevo	– Ondulado.
Drenagem interna	– Bem drenado.
Profundidade	– Profundo e muito profundo.
Textura do horizonte A	– Arenosa (areia franca).
Textura do horizonte B	– Média (franco argilo arenosa).
Estrutura do horizonte A	– Composta granular pequena e média e grãos simples.
Estrutura do horizonte B	– Blocos subangulares pequenos e médios.
Resistência à erosão	– Baixa.
Retenção de água	– Moderada.
Fertilidade natural	– Alta.
Uso atual	– Pastagem.

De acordo com o Levantamento Semidetalhado e o Mapa dos Solos da Bacia do Rio Santo Anastácio, na escala de 1:50.000 (Carvalho et al., 1997, 2002) os solos da área estudada são ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrúpticos A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia (bacias 2 e 3) e subperenifólia (bacias 1, 4 e 5) relevo ondulado, Quadro 1.

Os Argissolos são grupamento de solos constituídos por material mineral com argila de atividade baixa - Tb (capacidade de troca de cátions, T<27cmol$_c$/kg argila) e horizonte B textural (Bt) imediatamente abaixo de horizonte A ou E (EMBRAPA, 1999).

Os solos Podzólico Vermelho-Amarelo e Podzólico Vermelho Escuro ambos com horizonte B textural e com argila de atividade baixa, dentre outros, da classificação anteriormente usada na EMBRAPA Solos, correspondem aos ARGISSOLOS (EMBRAPA,1999).

Segundo Carvalho et al. (1997, 2002) que utilizaram os conceitos e critérios da EMBRAPA (1999), os ARGISSOLOS da área estudada apresentam as seguintes características (Quadro 1): - Quanto à profundidade do solo, que diz respeito a todo o conjunto de horizontes e camadas existentes acima do substrato rochoso coerente (*solum*), são predominantemente profundos (>100 ≤ 200 cm) e muito profundos (> 200 cm); - Geralmente apresenta a seqüência de horizontes, Ap - E - Bt1 - Bt2 - Bt3 – BC; - O horizonte diagnóstico A (horizonte superficial) é do tipo moderado, com espessura de 10 a 30 cm e com teor de carbono orgânico em média de 7,7g.dm^{-3}; – A cor do horizonte A, com a amostra úmida normalmente é bruno avermelhado escuro (5YR 3/4 ou 2,5YR 3/4); - A cor do horizonte Bt com a amostra úmida pode variar de vermelho (2,5YR 4/6, 4/8 ou 5/8) e vermelho escuro (2,5YR 3/6); - A cor do horizonte BC, horizonte transicional com mais características de B do que de C é vermelho (2,5YR 4/6 ou 4/8); - A textura do horizonte A e/ou E é arenosa (classes areia e areia franca, <15% de argila e >70% de areia), com predominância da classe textural areia franca; - A textura do horizonte Bt e BC, é média (<35% de argila e >15% de areia, excluídas as classes areia e areia franca), com predominância da classe textural franco argilo arenosa; - A estrutura do horizonte A é composta, granular pequena (1-2 mm de diâmetro) e média (2-5 mm de diâmetro) fraca e grãos simples (não coerente); - O horizonte Bt apresenta

estrutura do tipo blocos subangulares de classe pequena (5-10 mm de diâmetro) e média (10-20 mm de diâmetro) e de grau de desenvolvimento fraco e moderado e cerosidade, isto é, películas muito finas de material inorgânico, visíveis nas faces dos elementos estruturais, com grau de desenvolvimento variando de fraco e moderado e quantidade pouca (a cerosidade é indicativa de ocorrência de processo de iluviação que é a deposição de material de solos removido de um horizonte superior para um inferior no perfil-de-solo); - A estrutura do horizonte BC, é maciça porosa que se desfaz em granular, pequena e fraca. Os solos são Eutróficos ao logo do perfil, com saturação por bases, que se refere à proporção (taxa percentual) de cátions básicos trocáveis (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) em relação à capacidade de troca catiônica (CTC), superior ou igual a 50% (variando de 50 a 95 %); - O gradiente textural, média aritmética do teor de argila total do horizonte B (excluído o BC) pelos teores médios do horizonte A, varia de 1,8 a 3,8 tendo como média o valor 2,58; - A mudança textural é abrupta e consiste em um considerável aumento no conteúdo de argila dentro de pequena distância na zona de transição entre o horizonte A ou E e o horizonte subjacente B; - Os Argissolos não apresentam, naturalmente, qualquer impedimento físico à penetração do sistema radicular pelo menos até 200cm de profundidade.

De modo geral os Argissolos são suscetíveis à erosão, por apresentarem gradiente textural entre o horizonte A ou E e o B, uma vez que o horizonte subsuperficial de menor permeabilidade, favorece o escoamento superficial das águas pluviais e, consequentemente a erosão. Mas, quando além do gradiente textural a mudança textural entre o horizonte A ou E e o B é abrupta e ocorrem em relevo ondulado e forte ondulado são muito mais suscetíveis à erosão, e neste caso apresentam-se com baixa resistência à erosão (Carvalho et al. 1997, 2002); todavia, a cobertura vegetal de gramíneas, que predominam nesses solos, contribui para minimizar a erosão (Azevedo, 1999).

Geralmente as pastagens do oeste do Estado de São Paulo são formadas com capim *Brachiaria decumbens* Staph (braquiária). Esta braquiária é uma gramínea perene, herbácea, decumbente, que ocupa totalmente o terreno devido a grande capacidade que possui em se alastrar, formando uma densa vegetação de 60 a 70 cm de altura. Bastante agressiva, essa forrageira ocupa rapidamente o terreno, gramando-o de forma “impressionante“ (Pupo, 1985). Por essa razão, a *Brachiária decumbens* tem sido a gramínea preferida para formar pastagens em terrenos mais declivosos.

5.1.2 Bacias hidrográficas

Foram utilizadas, neste estudo, cinco bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação, representativas do ARGISSOLO. Essas Bacias pertencem ao sistema hidrográfico da bacia do Rio Santo Anastácio nos municípios de Marabá Paulista (Bacia 1), Presidente Bernardes (Bacia 2 e 3) e Santo Anastácio (Bacia 4 e 5).

5.1.3 Fotografias aéreas

Foram utilizadas fotografias aéreas verticais pancromáticas, branco e preto, provenientes da cobertura aerofotogramétrica do Projeto Obra 361 (R), Porto Primavera, Taquaruçu efetuadas em 1978 pela Terrafoto/CESP na escala nominal aproximada 1:20.000. O recobrimento entre as fotografias é de 60% na mesma faixa de vôo e de 30% entre faixas adjacentes, o que permite a visão estereoscópica, ou seja, a percepção da terceira dimensão.

5.1.4 Material cartográfico e mapas geológico, geomorfológico e pedológico

Para a localização e estudo do relevo das bacias hidrográficas estudadas foram utilizadas folhas da Carta do Brasil provenientes de restituição aerofotogramétrica na escala 1:50.000 com curvas de nível de 20 em 20 metros, editadas em 1974, pelo IBGE. As folhas utilizadas foram as seguintes: Presidente Bernardes (SF-22-Y-B-II-20); Santo Anastácio (SF-22-V-D-V-4) e Marabá Paulista (SF-22-Y-B-II-1).

Serviu de base para interpretações geomorfológicas o mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, na escala 1:500.000 (IPT, 1981 a), para interpretações geológicas, o mapa geológico do Estado de São Paulo, na escala 1:500.000 (IPT, 1981 b) e, para verificação dos solos o mapa semidetalhado de solos da bacia do Rio Santo Anastácio (Carvalho et al. , 1997,2002), na escala 1:50.000.

5.1.5 Equipamentos

Para as observações estereoscópicas dos pares de fotografias aéreas foi utilizado estereoscópio de espelhos Wild, modelo ST4. Os demais equipamentos utilizados para as diversas medições foram os seguintes: curvímetro marca Derby (perímetro e comprimento de segmentos de rios), escala triangular (distâncias) e planimetro Polar, marca OTT (áreas).

5.1.6 Malha para a determinação da dimensão fractal (D)

Utilizou-se malhas com tamanho de 2,0mm $_{x}$ 2,0mm, com uma área suficiente para o cobrimento das figuras, ou seja, das bacias hidrográficas.

5.1.7 Software

A transformação das representações contidas nas cartas topográficas na escala 1:50.000 para a escala 1:20.000 e a interpolação das curvas de nível de 20 em 20m para 10 em 10m, foram possíveis através do programa Photofinish, versão 3.0 (Windows 3.11).

A transformação das imagens das bacias hidrográficasde duas dimensões (2D) para três dimensões (3D) foi realizada através dos programas: Auto CAD 2000 e Surfer versão 6 (Windows 98).

5.2 Métodos

A seleção das áreas de estudo teve por base o mapa semidetalhado dos solos da Bacia do Ribeirão Santo Anastácio (Carvalho et al., 1997,2002), sendo escolhidas áreas pertencentes aos municípios de Presidente Bernardes, Santo Anastácio e Marabá Paulista.

As fotografias aéreas foram selecionadas em concordância com o mapa semidetalhado dos solos, de modo a conter os ARGISSOLOS.

5.2.1 Obtenção dos mapas da rede de drenagem

Foram elaborados mapas da rede de drenagem das áreas selecionadas utilizando-se área útil das fotografias aéreas conforme procedimento descrito em Coelho (1972). Após este procedimento, com o auxílio de estereoscopia as redes de drenagem foram demarcadas e decalcadas em filme de poliester “ultraphan”, assim como o divisor d’água das bacias. Após efetuar-se um controle das posições relativas das fotografias, montou-se os mapas das redes de drenagem.

A definição da rede de drenagem foi feita obedecendo à sugestão de Lueder (1959), Strahler (1957) e França (1968). Considerou-se tanto os cursos d’água permanentes como temporários, tomando-se o cuidado de demarcá-los quando bem definidos, estabilizados e claramente visíveis nas fotografias aéreas; desde que fizessem parte funcional do sistema de drenagem.

Em virtude de a fotografia aérea ser uma projeção cônica, para maior confiabilidade de escala, utilizou-se o programa PHOTOFINISH para transformação das representações contidas nas cartas na escala 1:50.000 para 1:20.000.

Dessa maneira a escala do mapa planialtimétrico (Carta do Brasil – IBGE), ficou compatível com a escala da fotografia aérea permitindo complementar a rede de drenagem e com segurança de escala uma vez que, o mapa planialtimétrico é uma projeção ortogonal.

5.2.2 Seleção das bacias hidrográficas

Nas redes de drenagem foram delimitadas, com o uso do estereoscópio, bacias de 3ª ordem de ramificação, segundo o sistema de Horton (1945) modificado por Strahler (1957), por serem eficientes no estudo de solos e facilitar a análise e a comparação das redes de drenagem, pois somente são comparáveis os elementos de mesma ordem de ramificação (França, 1968; Carvalho, 1977,1981; Carvalho et al.,1990). Azevedo (1999); Silva (2001) e Vilas Boas (2001).

As bacias de 3ª ordem de ramificação foram identificadas e transferidas para as cartas planialtimétricas com a escala transformada de 1:50. 000 para 1:20. 000, conforme o exposto no item anterior.

Preliminarmente, foram delimitadas várias bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação sendo que dentre elas foram selecionadas cinco bacias, utilizando-se o método de análise dimensional e teste de semelhança geométrica proposto por Strahler (1957) e modificado por França (1968).

Para a aplicação do referido método, as bacias hidrográficas foram comparadas duas a duas, através de parâmetros dimensionais.

Os parâmetros utilizados foram: maior comprimento e maior largura das bacias; comprimento do rio principal; comprimento total da rede; perímetro e área das bacias.

- maior comprimento (C): medido com compasso de ponta seca e escala, corresponde a, aproximadamente, a direção do vale principal entre a foz e o ponto extremo sobre a linha do divisor de águas;

- maior largura (L): medida com ponta seca e escala, corresponde à maior largura que corta transversalmente o vale principal;

- comprimento do rio principal (Cp): medido com curvímetro, correspondendo à representação horizontal das sinuosidades do rio principal, desde a foz até a nascente. O percurso estabelecido pelo rio principal foi determinado de acordo com o sistema de Horton por meio das ordens dos rios. Nos casos de dúvida, quando se confunde afluente e rio principal foi obedecida as duas regras desse autor que estabelecem: a) partindo da jusante da confluência, estender a linha do curso de água para montante, para além da bifurcação, seguindo-se a mesma direção. O canal confluente que apresenta maior ângulo é o de ordem maior; b) se ambos os cursos possuírem o mesmo ângulo, o rio de menor extensão é geralmente designado como o de ordem mais baixa;

- comprimento total da rede (Cr): medido com curvímetro, acompanhando as sinuosidades do rio principal e de seus tributários;

- perímetro (P): medido com curvímetro, corresponde ao comprimento da linha do divisor de águas que circunda a bacia;

- área (A): medida com planímetro, corresponde à área circunscrita pela linha do divisor de água que delimita a bacia.

Desta forma, foram selecionadas cinco bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação.

5.2.3 Análise da rede de drenagem

A rede de drenagem das bacias foi analisada segundo os elementos referentes à sua composição e ao seu padrão de drenagem.

5.2.3.1 Composição da rede de drenagem

A composição da rede de drenagem refere-se ao número e comprimento de rios nas diferentes ordens de ramificação de uma bacia (Horton, 1945).

Os elementos da composição da rede de drenagem foram obtidos segundo os critérios e processos descritos na bibliografia. Esses elementos são os seguintes:

- ordem de ramificação (w): os segmentos de rios ou canais de drenagem foram classificados segundo o sistema de Horton (1945), modificado por Strahler (1957).

- número de segmentos de rios: foram contados nas bacias, os segmentos de rios em cada ordem de ramificação e representados por **Nw** e o número total de segmentos de cada bacia por **Nt**. A partir das ordens observadas calculou-se o número de segmentos de rios de cada ordem de ramificação e o número total de segmentos de rios correspondentes a: a) média aritmética; b) média ponderada em relação à área das bacias; c) equação $\log Nw = a - bw$, ajustada por Maxwell (1955) e d) aplicação da lei de número de rios, enunciada por Horton (1945).

- razão de ramificação ou bifurcação, representada por **Rb**, corresponde à relação entre o número de segmentos de rios de uma dada ordem e o da ordem imediatamente mais elevada, Horton (1945). Segundo a Lei de número de rios estabelecida por esse autor os números de segmentos de rios das várias ordens de uma bacia formam uma série geométrica inversa ao número de ordem; nesta série, o primeiro termo é a unidade e a razão é a razão de ramificação. Foi calculado o valor médio de razão de ramificação (Rb) através do antilog b, segundo Maxwell (1955), onde a razão de ramificação é igual ao antilog b da equação ajustada para o número de segmentos de rios: $\log Nw = a - bw$.

- comprimento total de segmentos de rios: foram medidos com curvímetro os comprimentos de segmentos de rios de cada ordem e o comprimento total em cada bacia. A

soma dos comprimentos de segmentos de rios em cada ordem é representada por **Lw** e o comprimento total de rios da bacia por **Lt**. Foram calculados para as bacias os valores médios de comprimento totais de segmentos de rios em cada ordem e o comprimento total, através de: a) média aritmética; b) média ponderada em relação à área das bacias; c) equação $\log Lw = \log a - \log bw$, ajustada por França (1968) e d) aplicação da Lei de comprimentos de rios enunciada por Strahler (1957).

- razão de comprimento total, designada por **Rlw**, corresponde à relação entre a soma dos comprimentos dos segmentos de rios de uma dada ordem e o da ordem imediatamente superior (Strahler, 1957). Segundo a Lei do comprimento total de rios estabelecida por esse autor, a soma dos comprimentos de rios das várias ordens de uma bacia formam uma seqüência geométrica inversa ao número de ordem; nesta série o primeiro termo é o comprimento total da ordem mais elevada, e a razão é a razão de comprimento total. Para as bacias foi calculado o valor médio de razão de comprimento total **Rlw** através do antilog b da equação ajustada para o comprimento total de segmentos de rios segundo França (1968).

- comprimento médio de segmentos de rios: representado por **Lm**, foram obtidos dividindo-se a soma dos comprimentos de rios de cada ordem **Lw**, pelo número de segmentos de rios da referida ordem **Nw**. Portanto: $Lm = Lw/Nw$. Foram obtidos também para as bacias o valor médio dos comprimentos médios dos segmentos de rios em cada ordem e o total através de : a) média aritmética; b) média ponderada em relação às áreas das bacias; c) equação $\log Lmw = \log a + \log bw$, ajustada por Vasques Filho (1972) e d) aplicação da Lei de comprimento médio de rios enunciada por Horton (1945).

Observa-se que esta equação ajustada foi linearizada a partir da curva exponencial $Y = a\, b^X$, onde $Y = \log Lmw$ é a variável dependente; $a = \log a$ é o coeficiente linear da equação; $b = \log b$ é o coeficiente angular da equação; e $x = w$ é a variável independente. Portanto, a dedução desta equação é a seguinte:

$Y = a\, b^X \Rightarrow \log Y = \log a + \log b^X \Rightarrow \log Y = \log a + x \log b$, portanto $Y = a + bx$; e substituindo-se x *por* w, tem-se: $\log Lmw = \log a + \log bw$, o sinal da equação dependerá do valor de $\log b$.

- razão de comprimento médio: representada por **R1**, expressa a relação entre o comprimento médio de segmentos de rios de uma dada ordem e o da ordem imediatamente inferior, Horton (1945). Segundo a Lei de comprimento médio de rios estabelecida por esse autor, os comprimentos médios de rios das diversas ordens formam uma seqüência geométrica direta na qual o primeiro termo é o comprimento médio dos segmentos de primeira ordem e cuja a razão é a razão de comprimento médio. Para as bacias, foi calculado o valor médio de razão de comprimento médio **Rl** através do antilog b da equação ajustada para o comprimento médio de segmentos de rios, segundo Vasques Filho (1972).

5.2.3.2 Padrão de drenagem

O padrão de drenagem foi analisado segundo suas características quantitativas.

A obtenção das características quantitativas do padrão de drenagem obedeceu aos critérios descritos na bibliografia, assim:

- densidade de drenagem: designada por **Dd**, calculada segundo proposição de Horton (1945), corresponde à relação entre o comprimento total de rios de 1ª ordem da bacia e a sua respectiva área, sendo expressa em km de rios/km^2.

- freqüência de rios: designada por **Fr**, calculada segundo Horton (1945), corresponde à relação entre o número total de rios de 1ª ordem da bacia e a sua respectiva área, expressa em número de rios/km^2.

- razão de textura: designada por **T**, calculada segundo Smith (1950), com modificação de França (1968), corresponde à relação entre o número total de rios de uma dada bacia e seu respectivo perímetro, expressa em número de rios/km.

- razão de textura média: designada por **Tm**, calculada segundo Smith (1950), com modificação de França (1968), pela fórmula:

$$Tm = \Sigma (A \times T) / \Sigma A$$

onde: Tm = razão de textura média;

A = área das bacias em Km^2;

T = razão de textura de cada bacia hidrográfica;

- textura topográfica: a textura topográfica das áreas estudadas foi classificada obedecendo à proposição de Smith (1950) e adaptação de França (1968):

Tm	classe de textura topográfica
Abaixo 2,5	grosseira
2,5 a 6,2	média
Acima 6,2	fina

5.2.4 Análise do relevo

Para a análise do relevo utilizou-se as folhas da Carta do Brasil dos municípios de Presidente Bernardes (SF-22-Y-B-II-20); Santo Anastácio (SF-22-V-D-V-4) e Marabá Paulista (SF-22-Y-B-II-1), editadas pelo IBGE na escala de 1:50.000 com curvas de nível com eqüidistância vertical de 20m.

Os mapas planialtimétricos das bacias hidrográficas foram obtidos transferindo-se os divisores d'água das bacias, representados nos mapas das redes de drenagem, para as cartas topográficas de 1:20.000 com curvas de nível de 20 em 20m.

Nas referidas bacias foram interpoladas curvas de nível com intervalo vertical de 10 em 10m, para a definição mais criteriosa do relevo.

5.2.4.1 Análise de aspectos do relevo

O relevo das bacias foi estudado analiticamente através dos seguintes parâmetros:

- maior altitude: designada por **MA**;

- menor altitude: designada por **mA**;

- altitude média: designada por **Hm**, foi obtida através da média aritmética entre os valores de cota mais alta (cabeceira) e cota mais baixa (foz ou desembocadura);

- amplitude altimétrica: designada por **H**, corresponde à diferença entre a maior e a menor cota altimétrica;

- razão de relevo: designada por **Rr,** foi calculada conforme a proposição de Schumm (1956), através da relação entre a diferença de cota dos pontos extremos da bacia hidrográfica e o seu comprimento. Segundo Strahler (1957), a razão de relevo indica o declive total da superfície da bacia. É um número sem dimensão, por isso facilmente correlacionável com outras medições, independendo do tamanho da bacia hidrográfica.

5.2.5 Análise fractal

A dimensão fractal foi determinada através do método SPA – BOX (Spadotto & Seraphim, 1998) método este que fixa uma malha de tamanho conhecido (2,0mm $_x$ 2,0mm) e sob a qual se coloca a figura (gráfico ou imagem) a ser analisada. O SPA – BOX tem como base a fórmula de Spadotto para determinar a dimensão fractal (D), que é D = log V_2 / log $\sqrt[b]{M}$. No SPA – BOX é contado o número de caixas no lado maior (I) vezes lado menor (i), sendo que (i $_x$ I) é igual a "M" ou massa aparente (M = i $_x$ I); V_2 ou volume aparente é obtido contando-se as caixas das bordas das figuras ou acompanhando-se as irregularidades de um gráfico, se for o caso.

Aplicou-se a dimensão fractal para as bacias hidrográficas procurando-se obter os elementos que melhor os define para possibilitar a comparação com os parâmetros convencionais que definem a relação entre a infiltração e o deflúvio dos solos.

A dimensão fractal foi obtida para o contorno das bacias, que representa o perímetro, para a superfície circunscrita ao divisor d'água, que representa a área, e para a rede de drenagem, representando a composição (número e comprimento dos segmentos dos rios).

A forma como foi disposta a malha e a contagem das caixas pode ser verificada, como exemplo, através das figuras: 2, 3, 4 e 5, utilizando-se como exemplo a bacia 2.

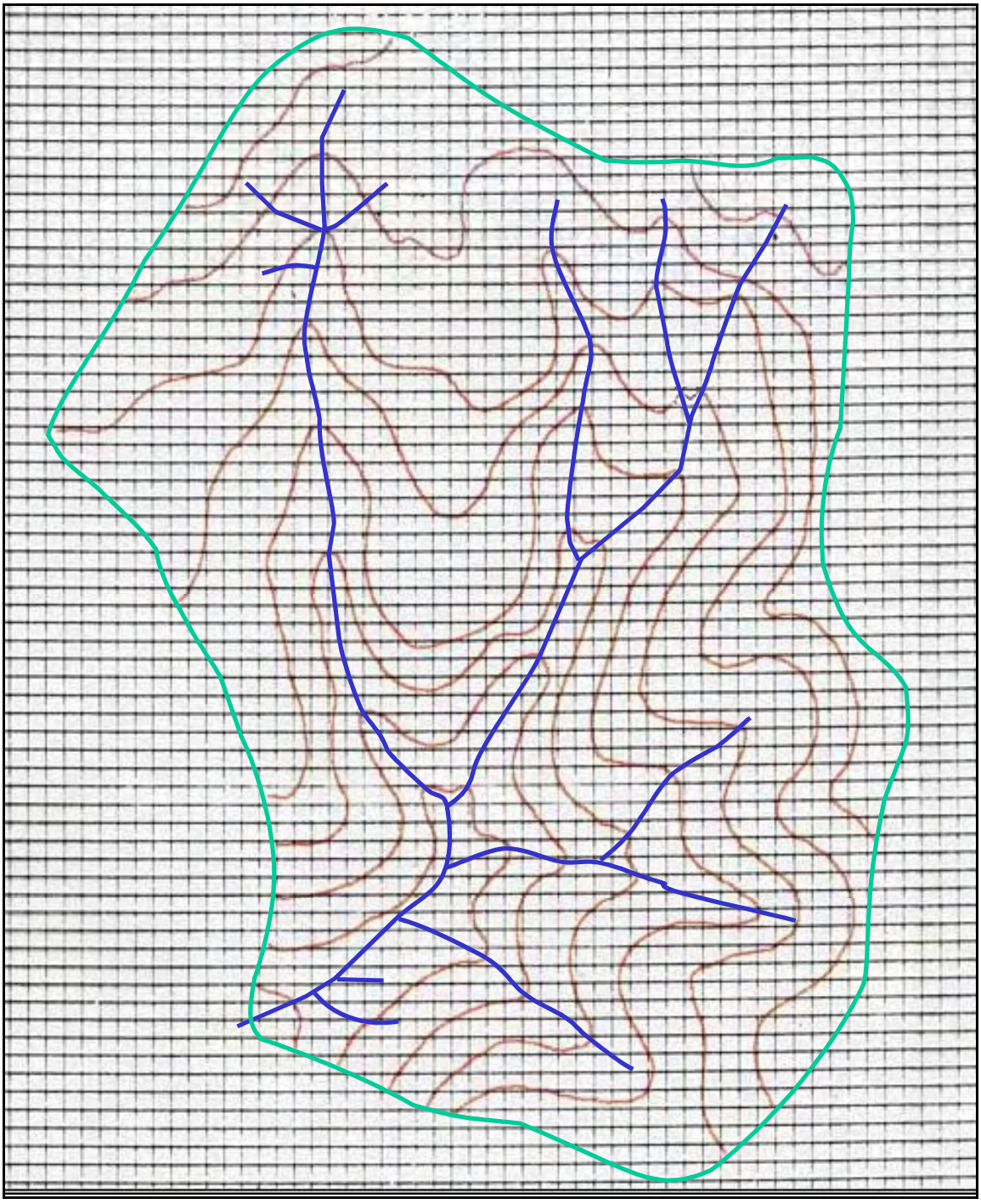


Figura 2 – Representação de uma bacia hidrográfica (bacia 1), com o recobrimento da malha usada para a determinação da dimensão fractal.

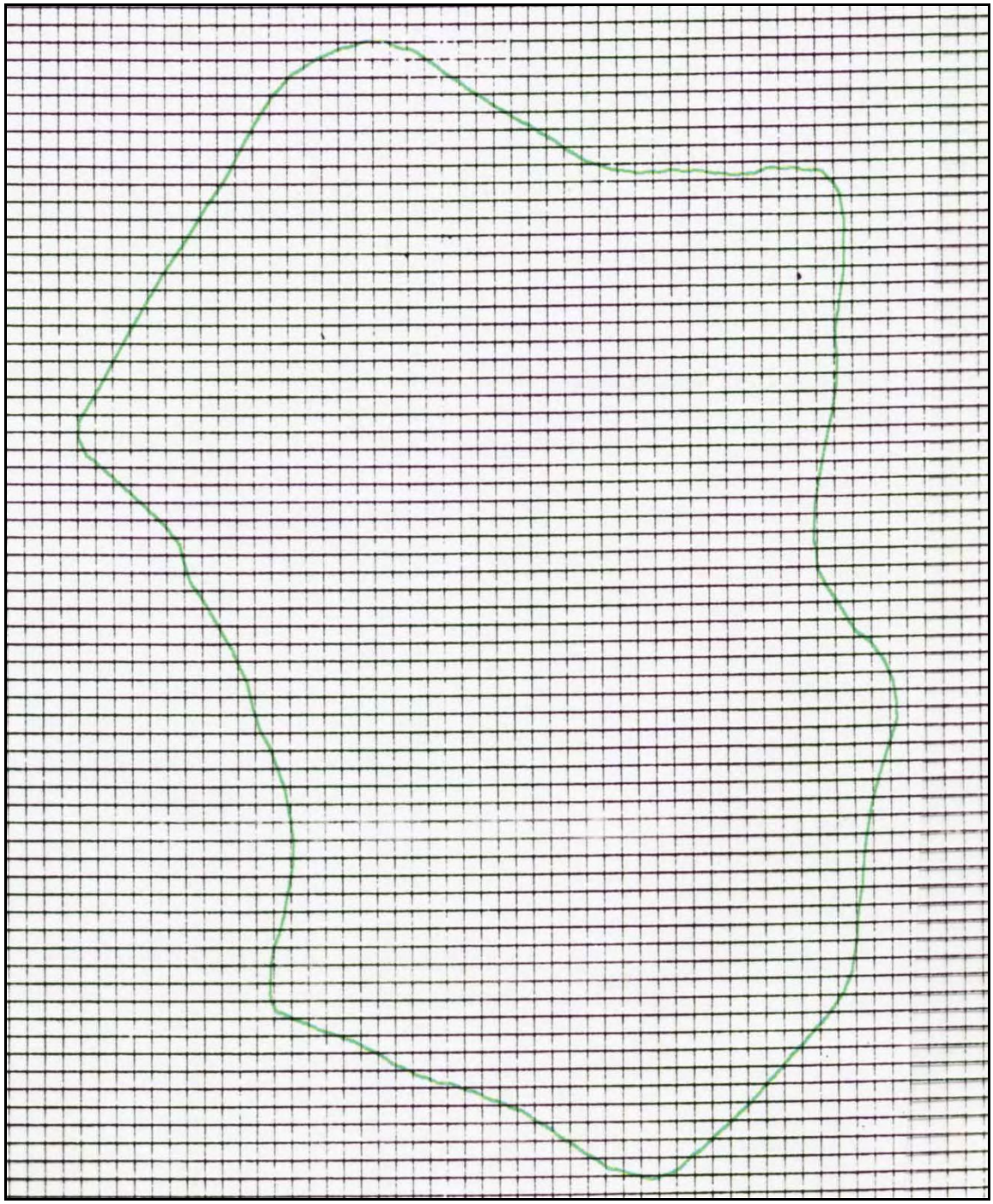


Figura 3 – Representação do contorno da bacia hidrográfica (divisor d'água) coberto com a malha, para a determinação das dimensões fractais do perímetro e da área da bacia.

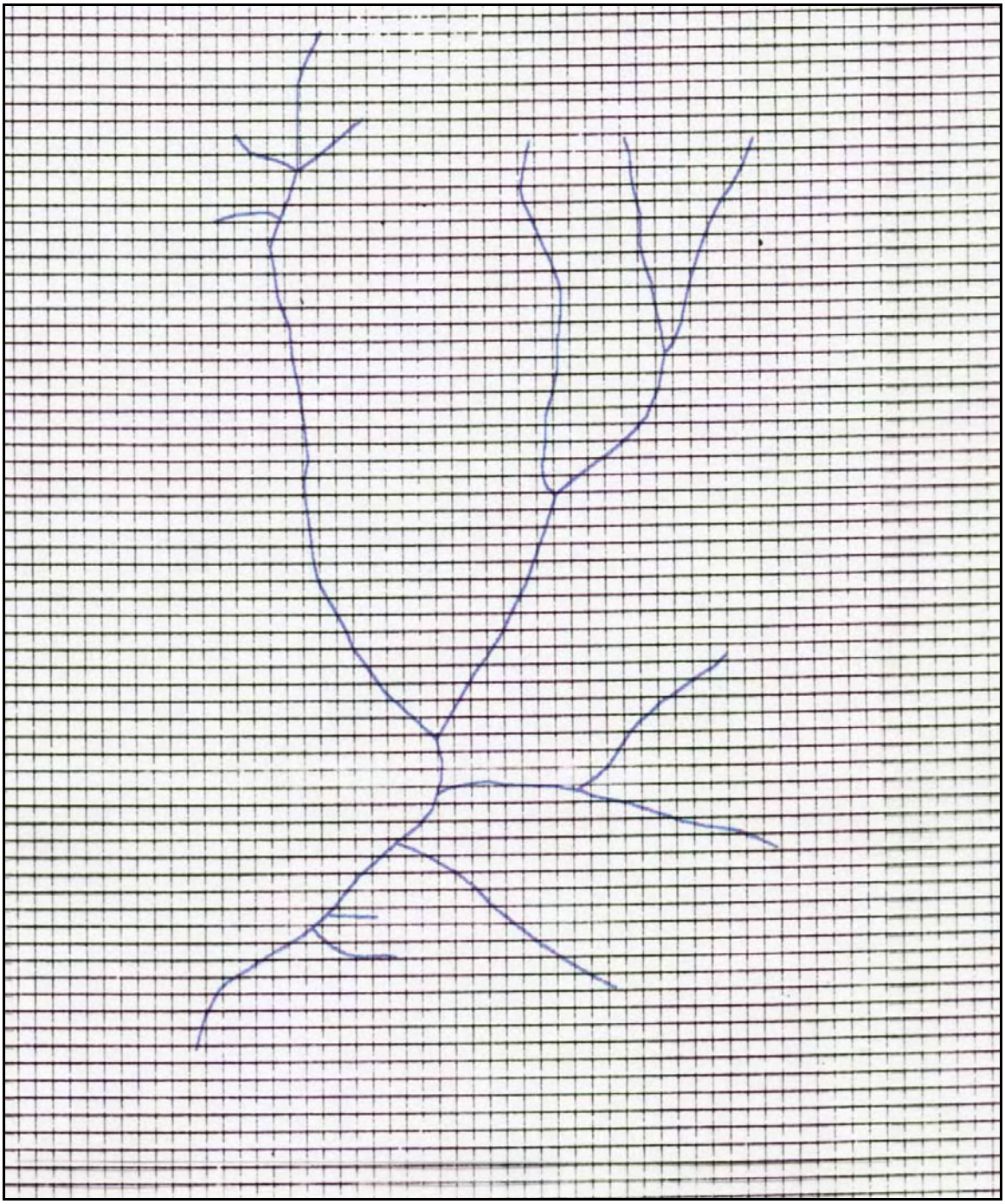


Figura 4 – Representação da rede de drenagem coberta com a malha, para a determinação da dimensão fractal da composição da rede de drenagem.

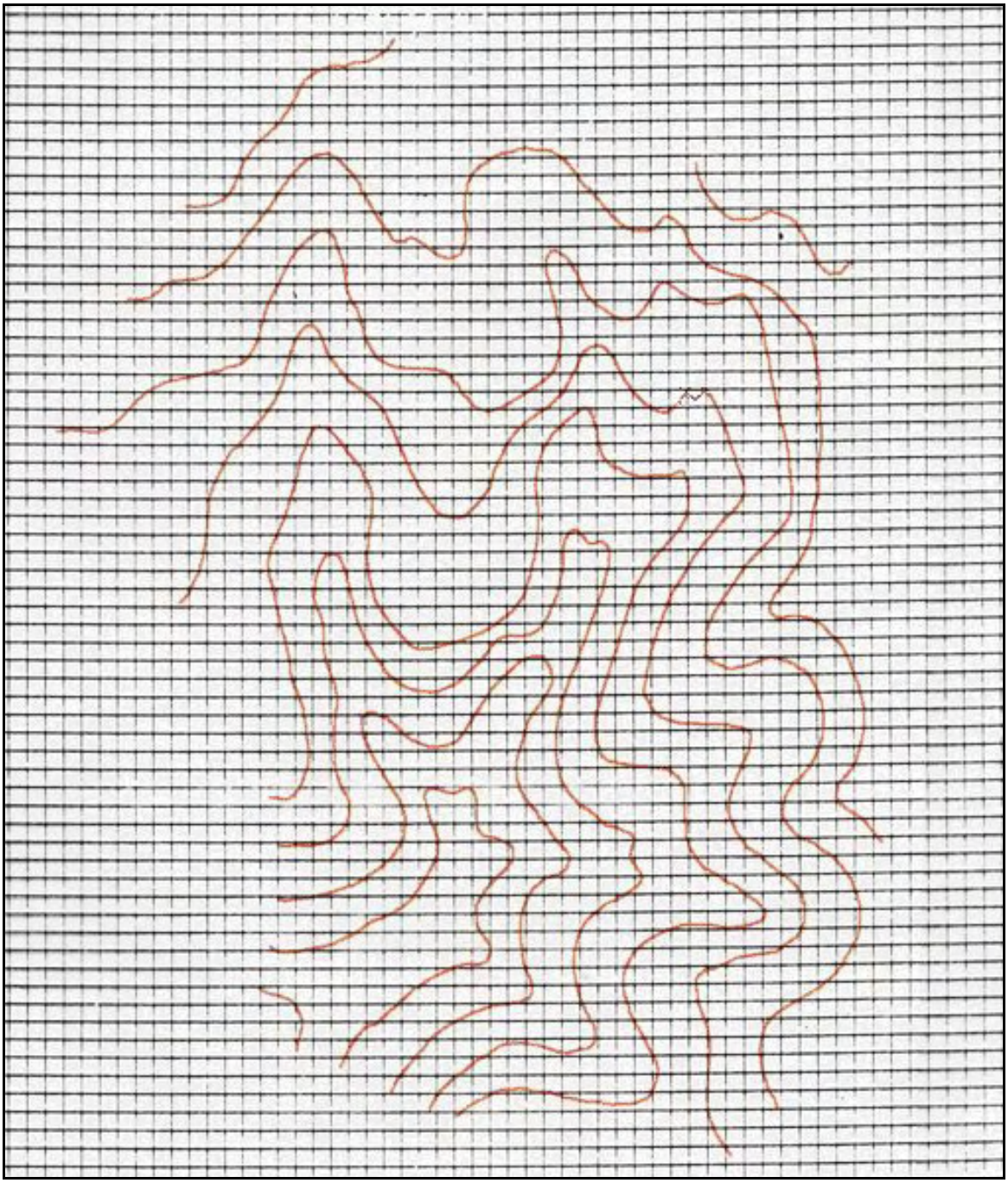


Figura 5 – Representação das curvas de nível cobertas com a malha, para a determinação da dimensão fractal das referidas curvas.

A dimensão fractal das curvas de nível, representativas do relevo, foram obtidas superpondo-se a malha nas bacias com suas respectivas curvas de nível, sendo que a contagem das caixas foi feita no traçado das curvas de nível.

A dimensão fractal foi obtida para as cotas de 440, 430, 420, 410, 400 e 390m, comum às cinco bacias.

A forma como foi disposta a malha nas bacias, e o procedimento para a obtenção da dimensão fractal das cotas pode ser verificado na figura 5.

A dimensão fractal obtida para os parâmetros representa a média dos valores obtidos pela contagem das caixas colocando-se a malha em posição diferente de observação e ao acaso, em três posições, resultando um total de trinta e três dados.

5.2.6 Análise estatística

A análise estatística dos resultados constou de:

1) Ajuste de equações de regressão monologarítmica (log Y = A + BX) para os valores referentes à composição da rede de drenagem, assumindo “Y “ os valores de número (Nw), comprimento total (Lw) e comprimento médio (Lmw) de segmentos de rios e “X “as ordens de ramificação (w).

2) Determinação do desvio padrão e coeficiente de variação (CV%) para os parâmetros da bacia: maior comprimento (C), maior largura (L), comprimento do rio principal (Cp), perímetro (P) e área (A); da composição da rede de drenagem: número de segmentos de rios (Nw1, Nw2 e Nt), razão de ramificação (Rb), comprimento total de segmentos de rios (Lw1, Lw2, Lw3 e Lt), razão de comprimento total RLw), comprimento médio de segmentos de rios (Lmw1, Lmw2, Lmw3 e Lmt) e razão de comprimento médio (Rl); do padrão de drenagem: densidade de drenagem (Dd), freqüência de rios (Fr) e razão de textura (T) e do relevo: maior e menor altitude (AM, Am), altitude média (Hm), amplitude altimétrica (H) e razão de relevo (Rr).

3) Análise de variância (considerando o delineamento experimental casualizado) e teste de médias de Tukey a 5% de probabilidade, sendo realizadas as seguintes análises:

- Para a Dimensão Fractal (D) da composição da rede de drenagem considerou-se 5 tratamentos, bacias 1; 2; 3; 4 e 5, com 11 repetições, totalizando 55 dados.

- Para a Dimensão Fractal (D) do perímetro considerou-se 5 tratamentos, bacias 1; 2; 3; 4 e 5, com 11 repetições, totalizando 55 dados.

- Para a Dimensão Fractal (D) da área considerou-se 5 tratamentos, bacias 1; 2; 3; 4 e 5, com 11 repetições, totalizando 55 dados.

- Para a análise global considerou-se a Dimensão Fractal (D) de 3 parâmetros (composição da rede de drenagem, perímetro e área) e 5 bacias equivalendo a 15 tratamentos ($5_x 3$) e com 11 repetições, totalizando 165 dados.

- Para a Dimensão Fractal (D) de cada uma das curvas de nível, comuns à todas as bacias, cotas de 440; 430; 420; 410; 400 e 390 m, considerou-se 5 tratamentos, bacias 1; 2; 3; 4 e 5, com 11 repetições, totalizando 55 dados. Assim foram realizadas seis análises de variância.

Utilizou-se programas do "Statistical Analysis System" versão 6.12 (SAS, 1996) para a análise dos dados que foi realizada no Pólo Computacional do Lageado-CINAG- Centro de Informática na Agricultura- FCA-UNESP-Botucatu-SP.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Seleção das Bacias Hidrográficas

Nos mapas da rede de drenagem das áreas foram obtidas cinco bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação, segundo o sistema de Horton (1945), modificado por Strahler (1957). A seleção das bacias teve por base o Mapa Semidetalhado dos Solos da Bacia do Rio Santo Anastácio, escala 1:50.000 (Carvalho et al., 1997, 2002).

Os parâmetros dimensionais das bacias, representativas do ARGISSOLO estão no Quadro 2, onde pode-se verificar que os valores médios do maior comprimento, maior largura, comprimento do rio principal, comprimento total da rede e perímetro em km são os seguintes: 2,284; 1,712; 2,028; 6,000; 6,552, respectivamente, e o valor médio da área das bacias é 2,380km^2. O coeficiente de variação (CV%) dos dados em relação às médias variou de 9,06 % a 15,63 %, sendo considerados valores baixo e médio (Gomes, 1987), o que leva a crer que a amostragem e a obtenção dos parâmetros foi bem criteriosa.

O estudo de redes de drenagem para discriminação de solos é, em linhas gerais, baseado na delimitação, análise e comparação de dados obtidos em pequenas bacias hidrográficas de mesma ordem de ramificação, com homogeneidade de solos e com semelhança geométrica; existindo semelhança geométrica, embora as bacias sejam de tamanho diferente, todas as medições guardarão razões de escala aproximadamente constantes (França, 1968).

Quadro 2 – Parâmetros dimensionais das bacias hidrográficas representativas do Argissolo

Bacias	Maior comprimento C (km)	Maior largura L (km)	Comprimento de rios Principal Cp (km)	Comprimento de rios Rede Cr (km)	Perímetro P (km)	Área A (km^2)
1	2,880	1,980	2,440	5,840	7,600	2,790
2	2,000	1,860	1,920	6,160	6,360	2,480
3	2,060	1,620	2,120	5,80	6,240	2,240
4	2,340	1,500	1,660	5,560	6,400	2,220
5	2,140	1,600	2,000	6,640	6,160	2,170
Média	**2,284**	**1,712**	**2,028**	**6,000**	**6,552**	**2,380**
Desvio Padrão	0,3570	0,1988	0,2855	0,4167	0,5936	0,2586
CV%	15,6300	11,6700	14,0800	6,9400	9,0600	10,8600

Assim, para dar maior segurança às comparações e maior consistência aos resultados foi testada a semelhança geométrica das bacias selecionadas. Os resultados da análise dimensional e semelhança geométrica (Strahler, 1957) aplicada as bacias, estão no Quadro 3. Para obter-se esses resultados, as bacias foram comparadas, relacionando-as duas a duas através dos parâmetros dimensionais, Quadro 2, obtendo-se para os valores lineares uma média que, elevada à sua razão quadrática foi comparada com sua relação de área. As diferenças de razões quadráticas das bacias comparadas variaram de 0,02 a 0,30, sendo considerados valores baixos (França, 1968). Assim, as bacias 2 e 4 guardam entre si maior similaridade, refletida pelo menor valor da diferença de razões quadráticas, pois à medida que essa diferença aumenta ocorre uma correlata perda de similaridade, Strahler (1957), França (1968), (Carvalho et al., 2000), Silva (2001).

Quadro 3 – Resultados da análise dimensional e semelhança geométrica aplicada às bacias hidrográficas do Argissolo

Bacias relacionadas	Razão de escala linear (R)						Razão de escala quadrática (R^2)		
	C / C'	**L / L'**	**Cp / Cp'**	**Cr / Cr'**	**P / P'**	**Rm**	**A / A'**	**Rm^2**	**Δ**
1 / 2	1,44	1,06	1,27	0,95	1,19	1,18	1,12	1,39	0,27
1 / 3	1,40	1,22	1,15	1,01	1,22	1,2	1,24	1,44	0,20
1 / 4	1,23	1,32	1,47	1,05	1,19	1,25	1,26	1,56	0,30
1 / 5	1,34	1,24	1,22	0,88	1,23	1,18	1,28	1,39	0,11
2 / 3	0,97	1,15	0,90	1,06	1,02	1,02	1,11	1,04	0,07
2 / 4	0,85	1,24	1,16	1,11	0,99	1,07	1,12	1,14	0,02
2 / 5	0,93	1,16	0,96	0,93	1,03	1,00	1,14	1,00	0,14
3 / 4	0,88	1,08	1,27	1,04	0,97	1,05	1,01	1,10	0,09
3 / 5	0,96	1,01	1,06	0,87	1,01	0,98	1,03	0,96	0,07
4 / 5	1,09	0,94	0,83	0,84	1,04	0,95	1,02	0,90	0,12

Rm - Razão média; **Δ** - Diferença.

6.2 Análise da Rede de Drenagem

As bacias hidrográficas foram delimitadas em divisores d'água de rios de 3ª ordem de ramificação, no mapa da rede de drenagem, com o auxílio da estereoscopia obtida com os pares de fotografias aéreas e o uso do estereoscópio, e transferidas para as folhas da Carta do Brasil, IBGE, com as representações transformadas, utilizando-se o Programa Photofinish, na escala 1:20.000, compatível com a escala do mapa da rede de drenagem. As bacias, com as curvas de nível eqüidistantes de 10 metros e seus respectivos modelos digital da topografia estão nas figuras numeradas de 6 a 15.

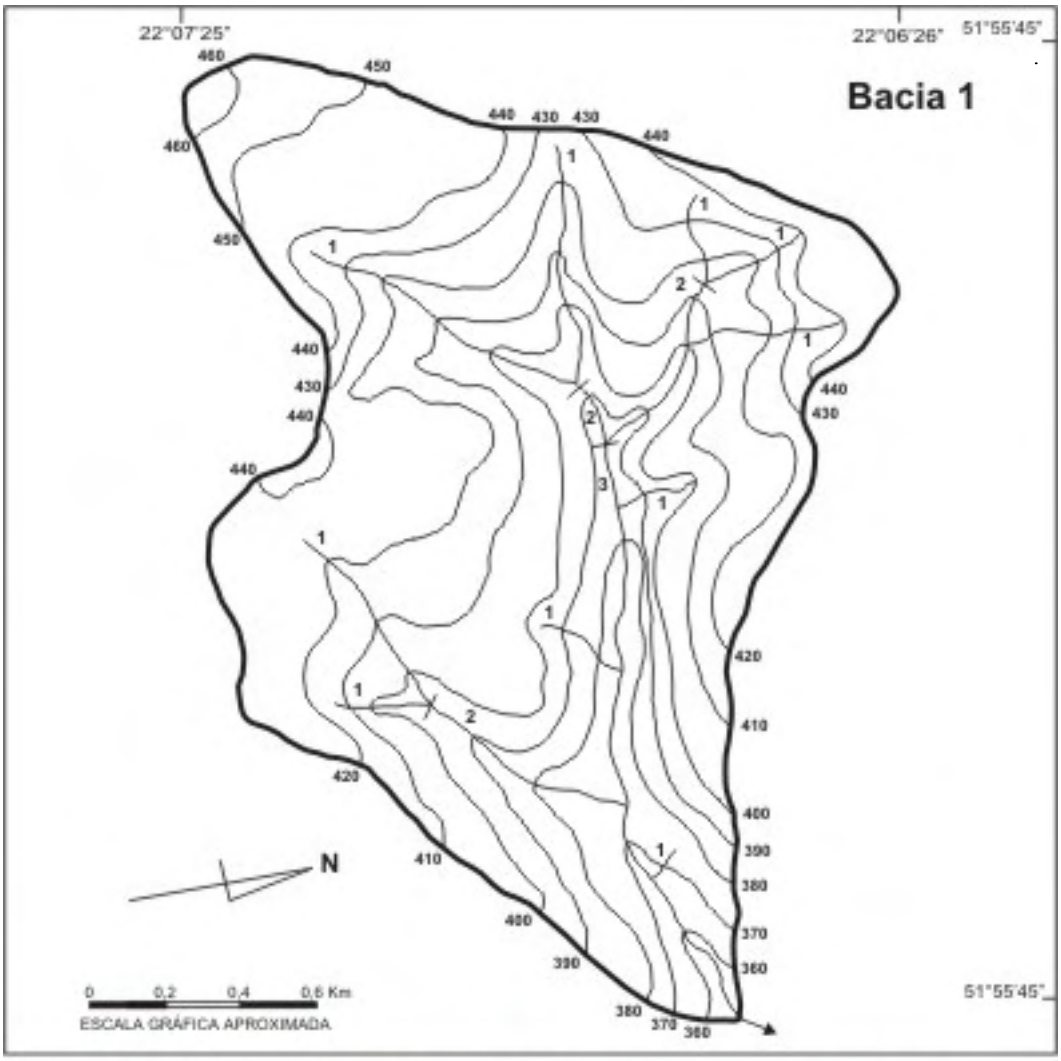


Figura 6 - Bacia hidrográfica 1 representativa de Argissolo no município de Marabá Paulista.
Escala 1:20 000

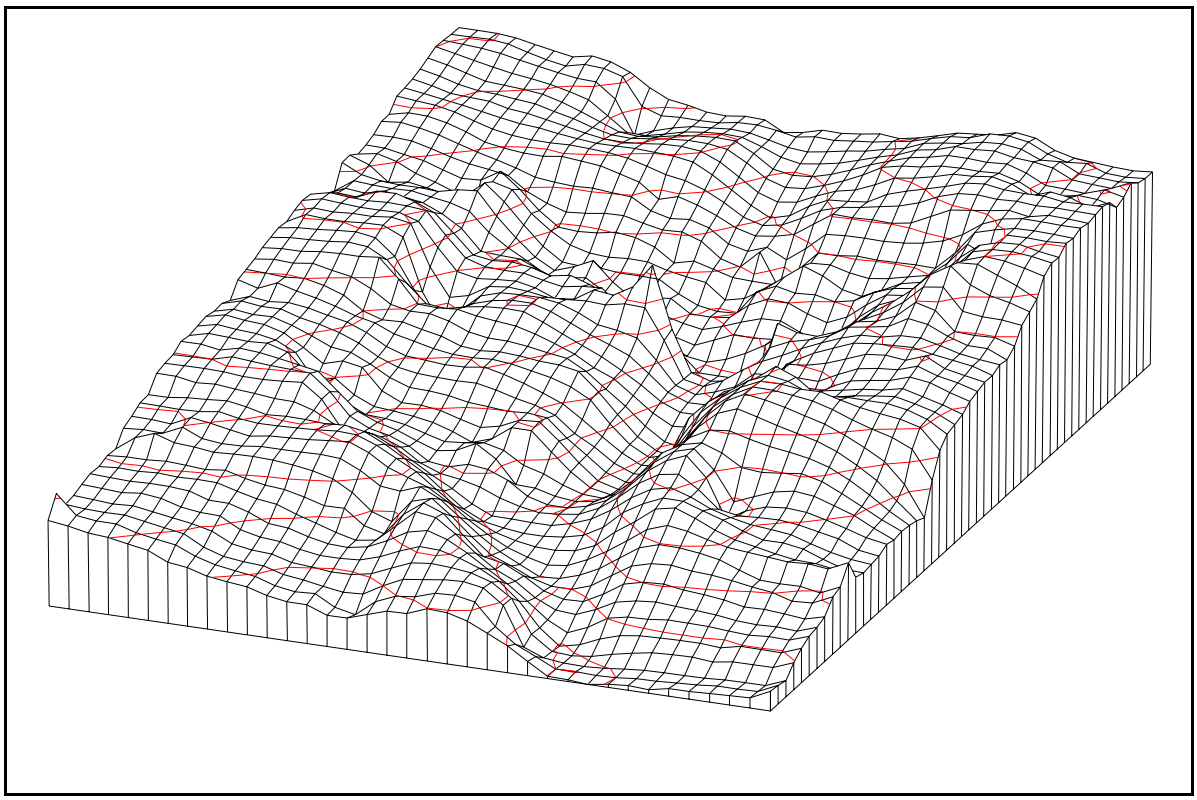


Figura 7 - Modelo digital da Bacia hidrográfica 1.

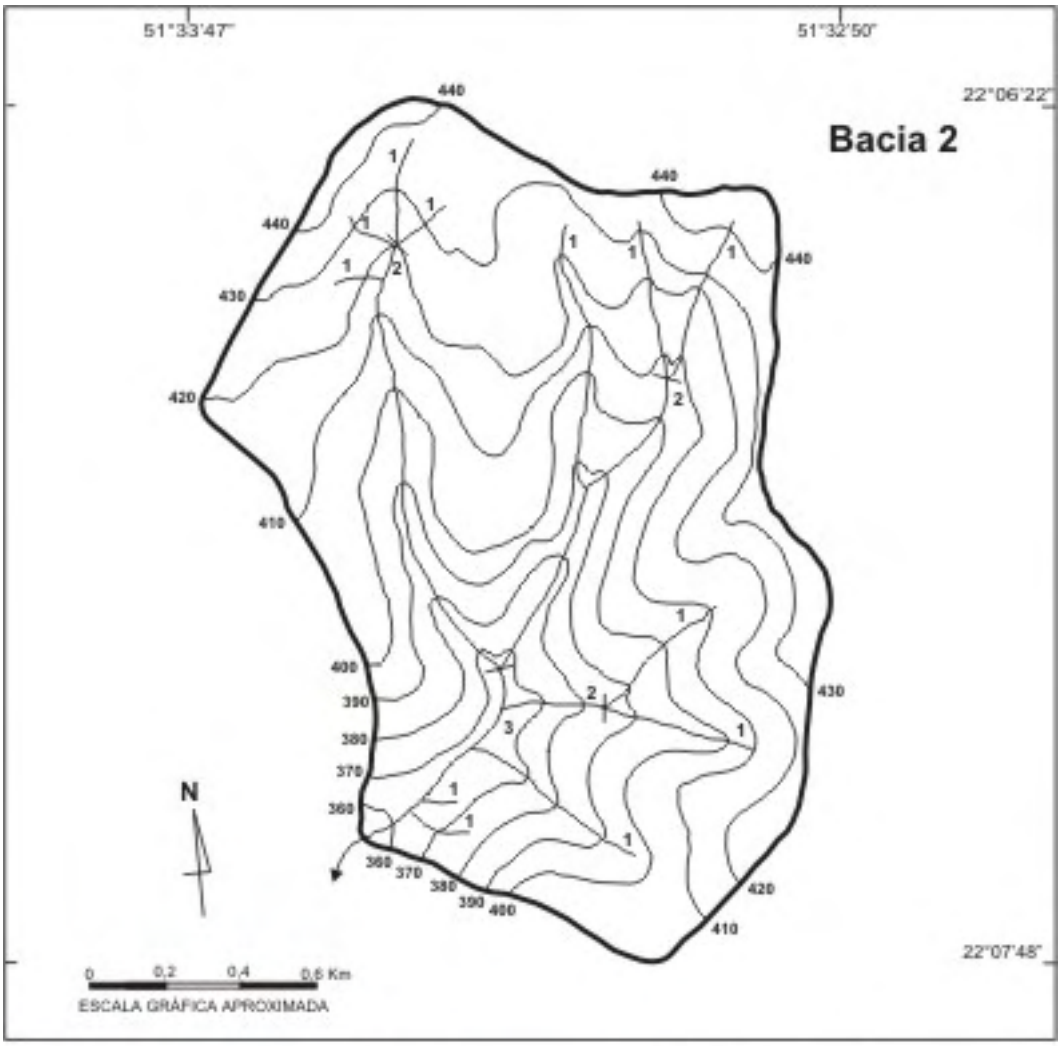


Figura 8 - Bacia hidrográfica 2 representativa de Argissolo, no município de Presidente Bernardes.
Escala 1: 20 000

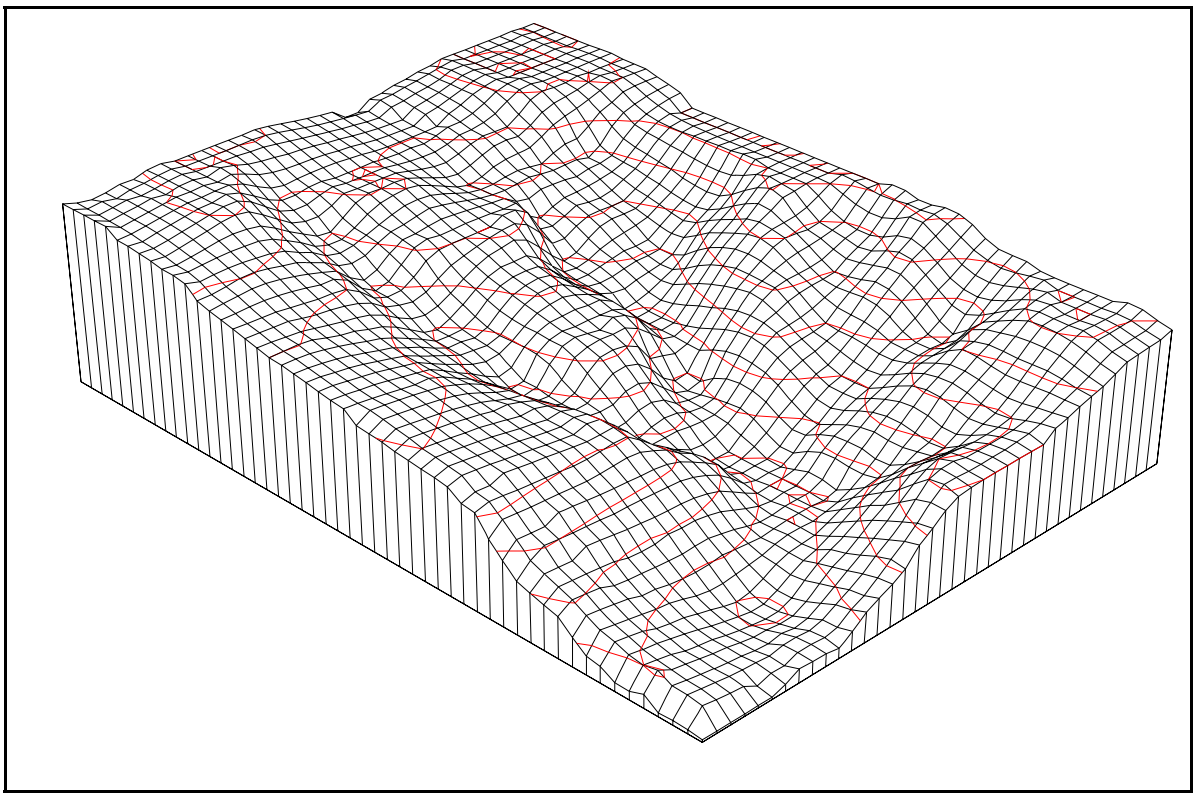


Figura 9 - Modelo digital da Bacia hidrográfica 2.

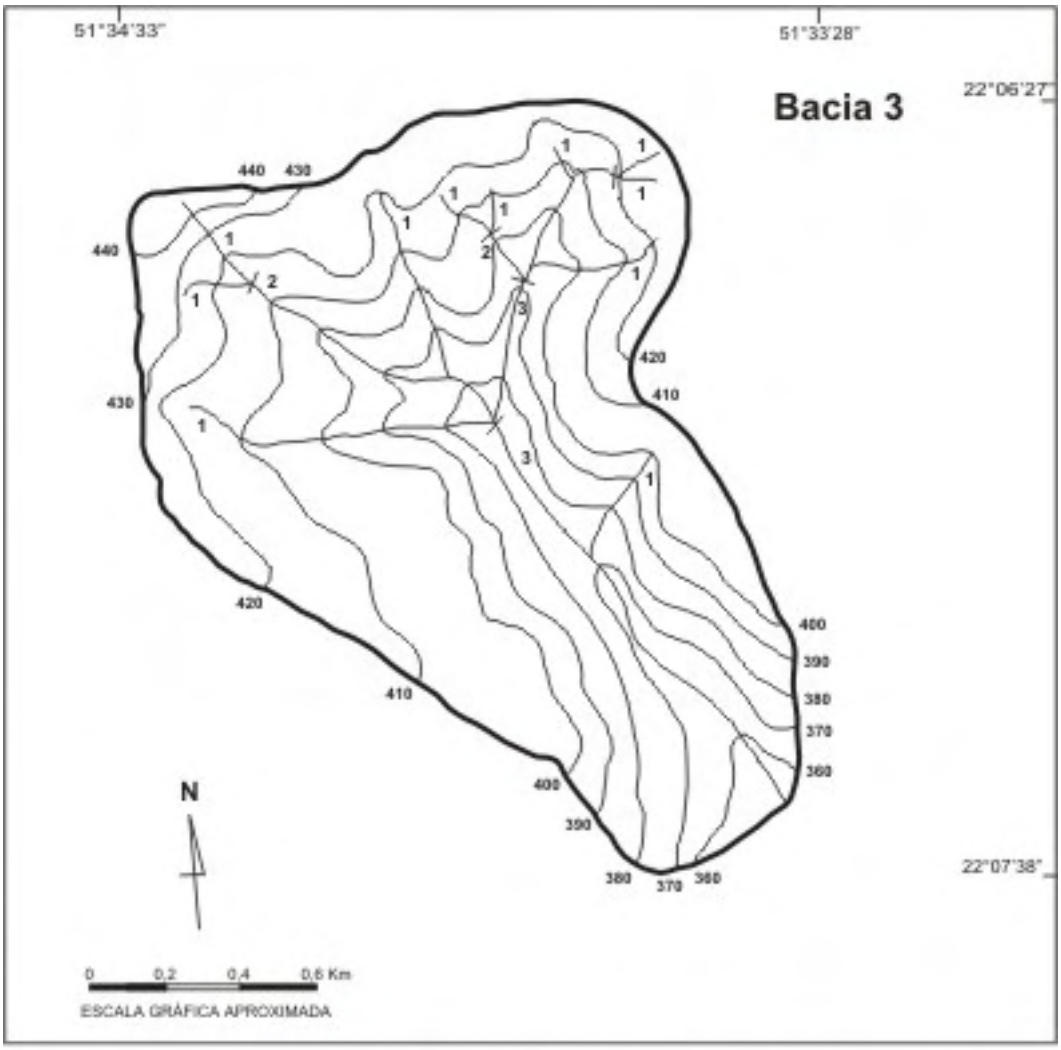


Figura 10 - Bacia hidrográfica 3 representativa de Argissolo,no município de Presidente Bernardes.
Escala 1:20 000

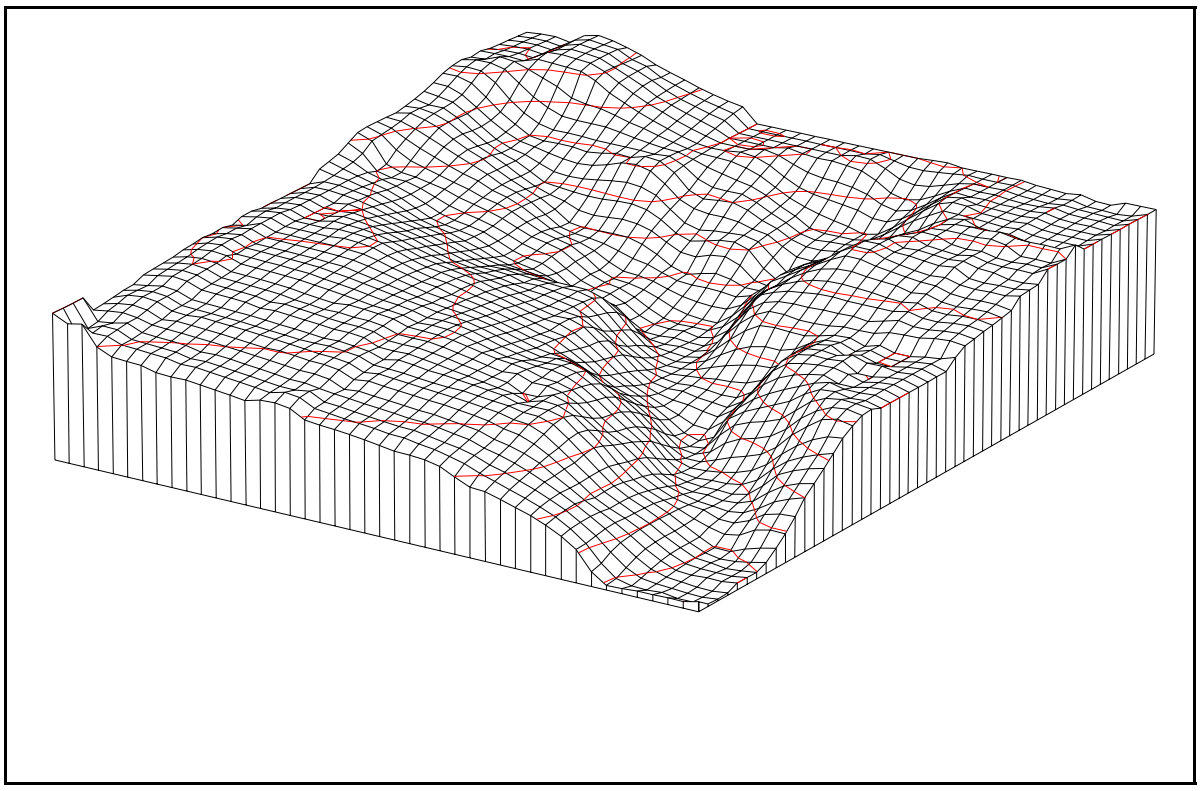


Figura 11 - Modelo digital da Bacia hidrográfica 3.

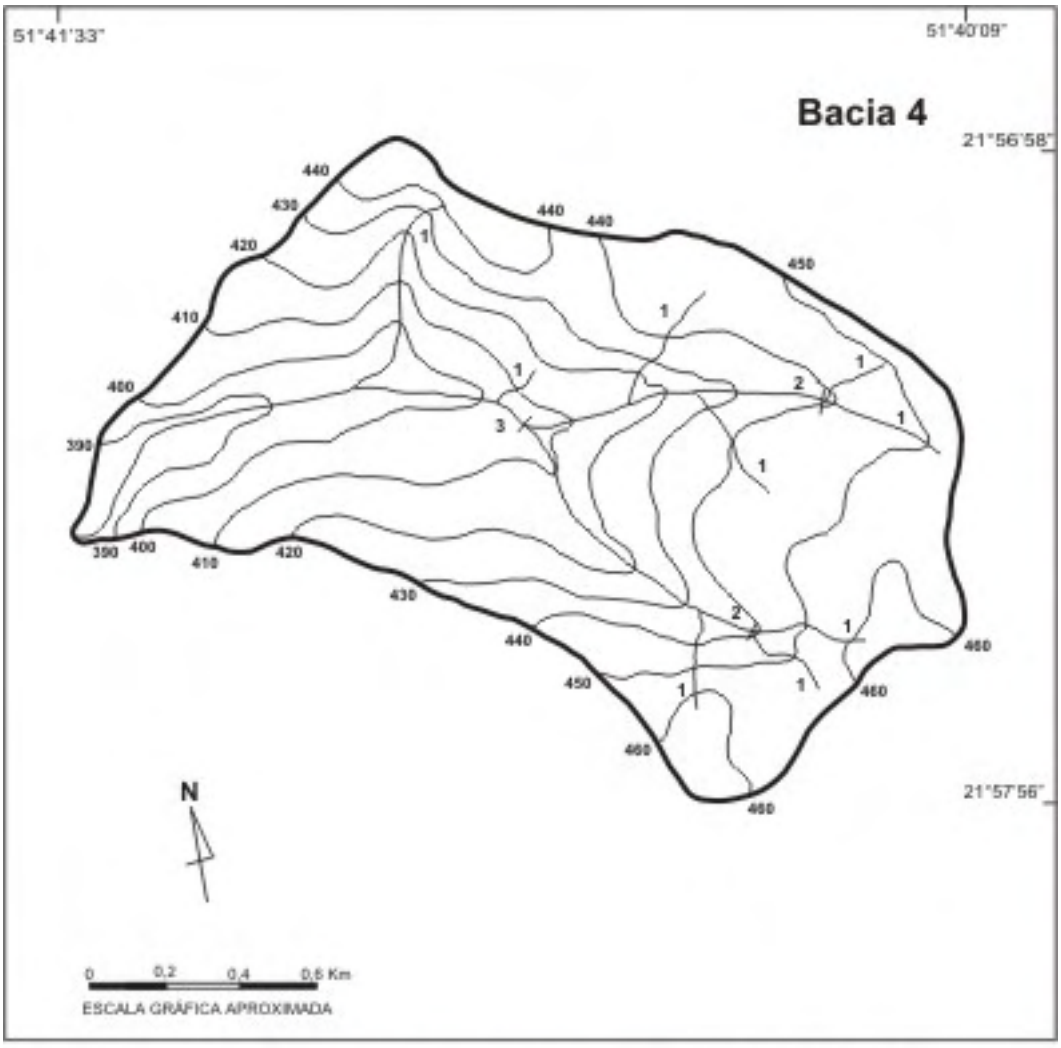


Figura 12 - Bacia hidrográfica 4 representativa de Argissolo,no município de Santo Anastácio.
Escala 1: 20 000

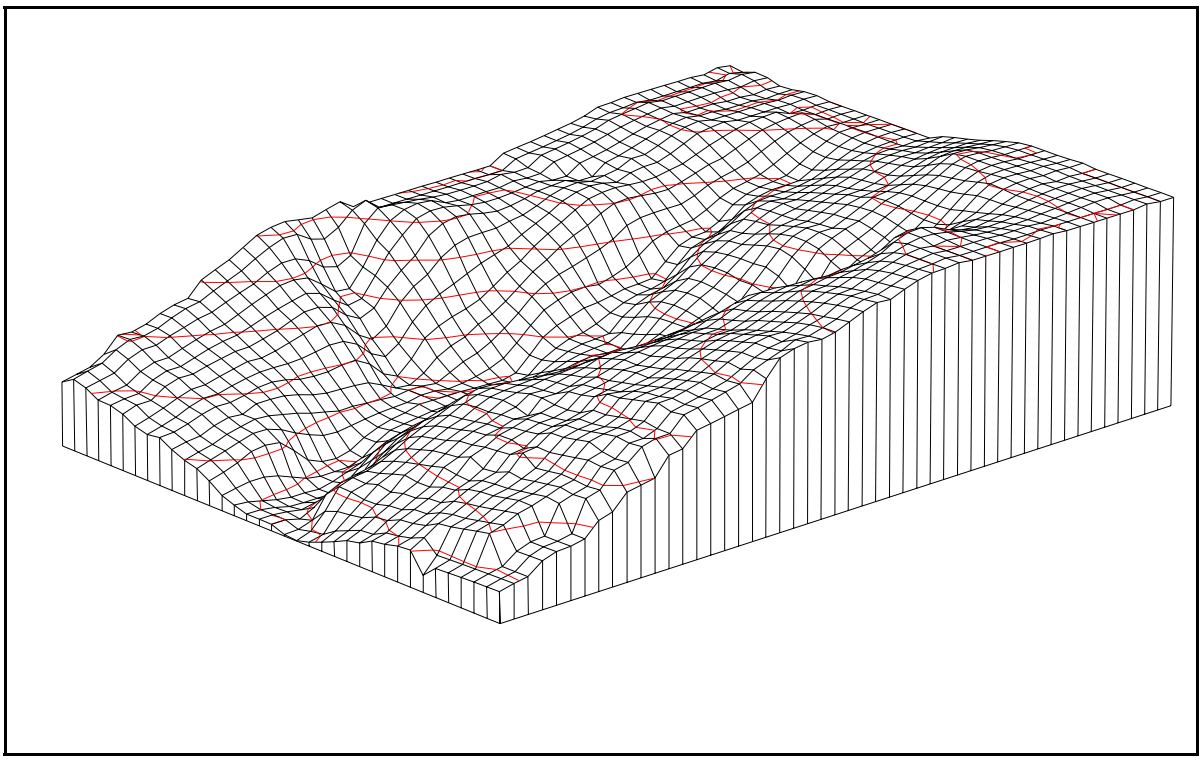


Figura 13 - Modelo digital da Bacia hidrográfica 4.

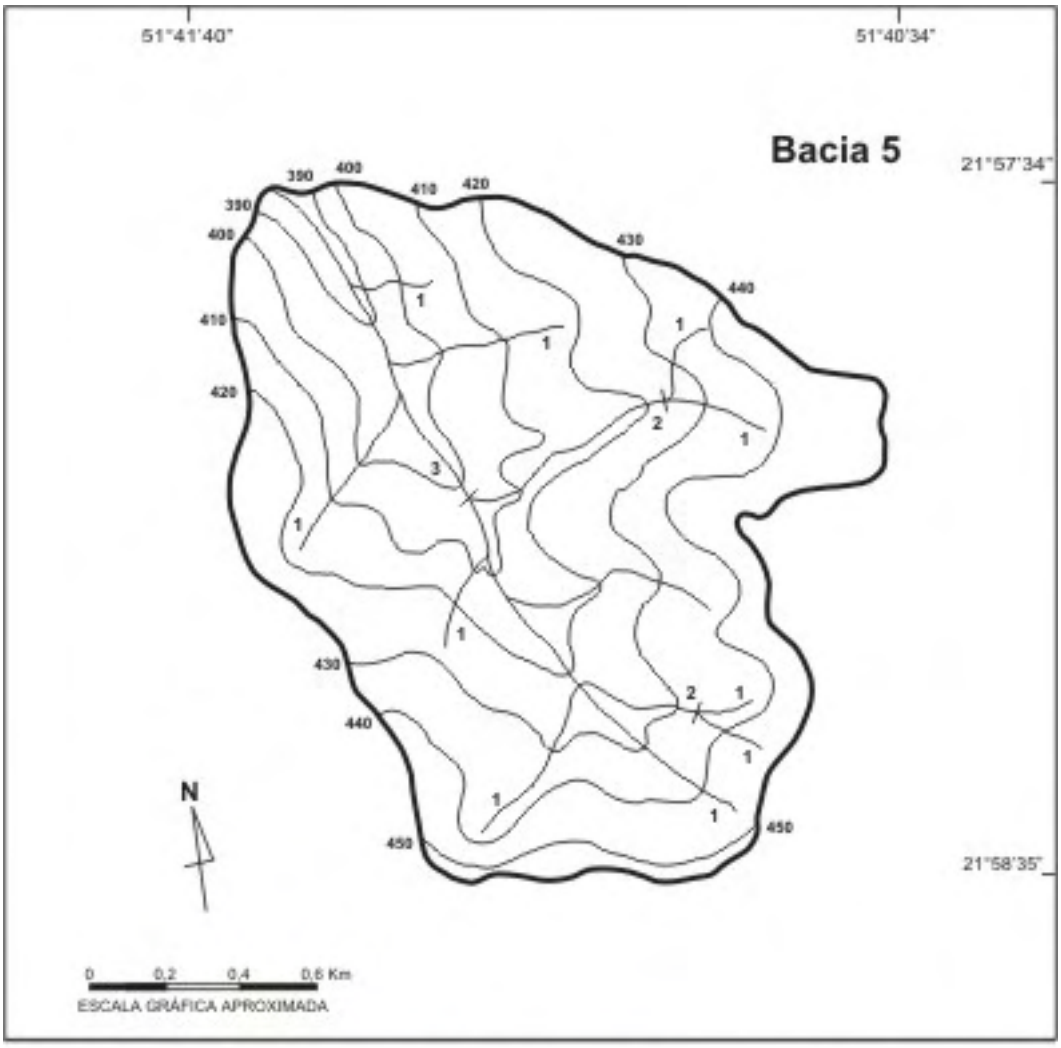


Figura 14 - Bacia hidrográfica 5 representativa de Argissolo, no município de Santo Anastácio.
Escala 1:20 000

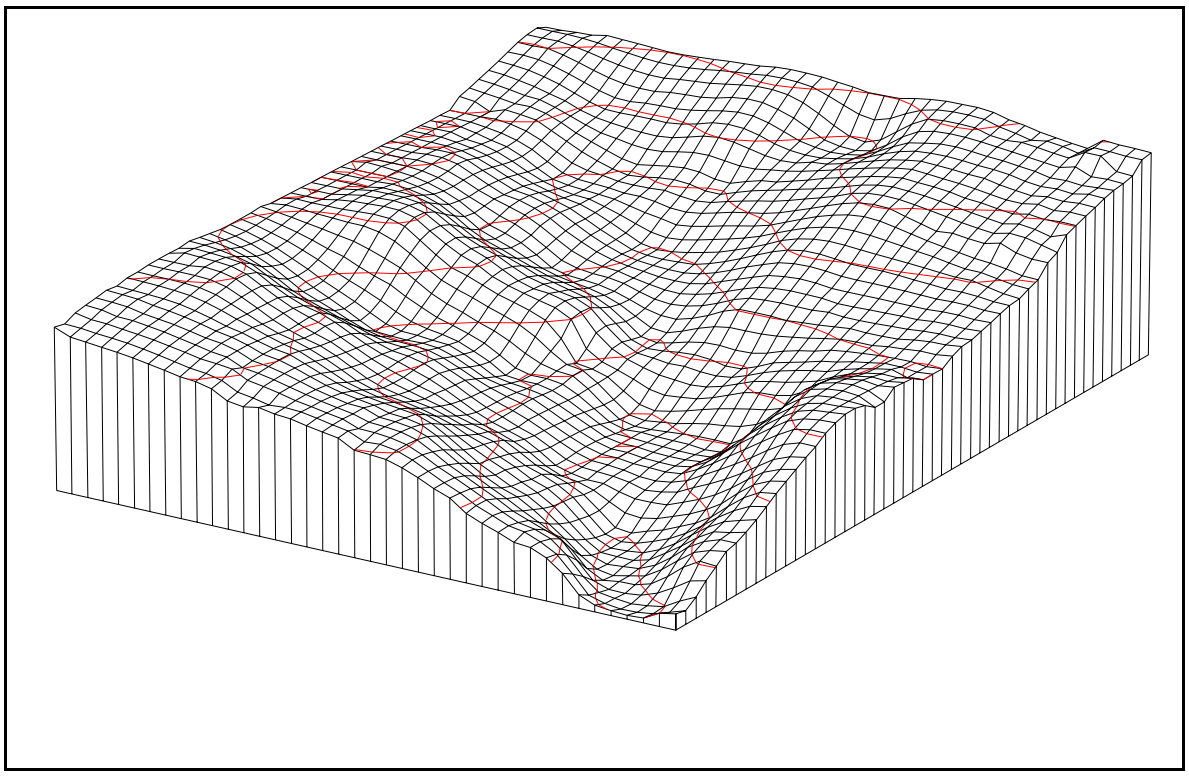


Figura 15 - Modelo digital da Bacia hidrográfica 5.

Foram estudadas bacias de 3ª ordem de ramificação, de acordo com as observações de França (1968), Carvalho (1977, 1981) e Carvalho et al. (1990, 2000), dentre outros autores, de que à medida que aumenta a ordem de ramificação, a rede de drenagem reflete mais o substrato rochoso do que o solo propriamente dito; e como as redes de drenagem se modificam na sua composição e características de acordo com a ordem de ramificação, este fato impõe ao estudo de bacias hidrográficas uma padronização da ordem de ramificação (Horton, 1945; Strahler, 1957; França, 1968).

A rede de drenagem foi analisada segundo as características referentes à composição e ao padrão de drenagem, para verificar possíveis diferenciações entre as bacias, provenientes da ação antrópica e obter um valor médio que caracterize a rede de drenagem dos ARGISSOLOS provenientes de produtos de alteração de arenitos do Grupo Bauru – Formação Adamantina e sob uso com pastagem há mais de vinte anos (Quadro 1).

6.2.1 Composição da rede de drenagem

A expressão “composição da rede de drenagem” indica os números e comprimentos de rios e seus tributários de diferentes ordens de ramificação, independente do padrão (Horton, 1945).

Os valores de número (Nw), comprimento total (Lw) e comprimento médio (Lmw), de segmentos de rios em cada ordem de ramificação, o número total (Nt), o comprimento total (Lt) e o comprimento médio total (Lmt), obtidos para as bacias hidrográficas estão no Quadro 4. Observa-se que, os valores da média aritmética e ponderada, em relação a área das bacias, são próximos, devido a pouca variação de suas áreas (2,17 a 2,79 km^2). O coeficiente de variação (CV%) dos dados em relação à média é considerado baixo para Lt (6,94%); médio para Nw_1 (10,76%), Nt (10,45%), Lw_1 (16,13%), Lw_2 (14,21%) e Lmw_1 (14,27%); alto para Nw_2 (21,07%) e Lmt (22,55%) e muito alto para Lw_3, Lmw_3 (44,54%) e Lmw_2 (32,14%), Gomes (1987). Os maiores coeficientes de variação para comprimento de segmentos de rios, provavelmente são devidos às variações nas sinuosidades dos rios que são medidas com o “curvímetro”, que não possibilita a medida de comprimento, quando as sinuosidades são pequenas e próximas.

Quadro 4 – Número, comprimento total e médio de segmentos de rios em cada ordem de ramificação para as bacias hidrográficas estudadas

Bacias	Ordem – Número total				Ordem – Comprimento Total (km)				Ordem – Comprimento Médio (km)			
N^0	Primeira	Segunda	Terceira	Nt	Primeira	Segunda	Terceira	Lt	Primeira	Segunda	Terceira	Lmt
1	10	3	1	14	3,7600	1,4800	0.6000	5,8400	0,3760	0,4933	0,6000	1,4693
2	12	3	1	16	3,7600	1,8000	0,6000	6,1600	0,3133	0,6000	0,6000	2,5133
3	11	3	1	15	2,8000	1,3600	1,6400	5,8000	0,2545	0,4533	1,6400	2,3478
4	9	2	1	12	2,7600	1,5600	1,2400	5,5600	0,3067	0,7800	1,2400	2,3267
5	11	2	1	14	3,8000	1,9200	0,9200	6,6400	0,3455	0,9600	0,9200	1,2255
Média*	10,6000	2,6000	1,0000	14,2000	3,3760	1,6240	1,0000	6,0000	0,3192	0,6573	1,0000	1,9765
Média**	10,6008	2,6311	1,0000	14,2319	3,4000	1,6193	0,9735	5,9928	0,3164	0,6452	0,9735	1,9351
Desvio												
Padrão	1,1402	0,5477	-	1,4832	0,5445	0,2308	0,4454	0,4167	0,0455	0,2112	0,4454	0,4456
CV %	10,7600	21,0700	-	10,4500	16,1300	14,2100	44,5400	6,9400	14,2700	32,1400	44,5400	22,5500

* Média aritmética; ** média ponderada, em relação às áreas das bacias.

As bacias caracterizam-se por ter em média (aritmética) um total de 14,2 segmentos de rios e destes 10,6 de 1ª ordem, 2,6 de 2ª ordem e 1 de 3ª ordem; um total de 6 km de rios, dos quais 3,376 km são de segmentos de 1ª ordem, 1,624 km de 2ª ordem e 1 km de 3ª ordem e um total de 1,9765 km de segmento médio total, dos quais, 0,3192 km são de 1ª ordem, 0,6573 km de 2ª ordem e 1 km de 3ª ordem.

Esses resultados estão de acordo com os encontrados por França (1968) e Carvalho (1977, 1981) e compatíveis com a relação entre a infiltração e o deflúvio dos Argissolos, que é menor, comparativamente em relação aos Latossolos, devido ao maior deflúvio, em função da menor permeabilidade do horizonte subsuperficial que favorece o escoamento superficial ou deflúvio das águas pluviais e do relevo ondulado com declives acentuados, entre 8 e 20% (Carvalho et al., 1997, 2002) e, conseqüentemente têm maior número de segmentos de rios , principalmente de 1ª ordem de ramificação.

Os valores das razões de ramificação (Rb), comprimento total (Rlw) e comprimento médio (Rl) da rede de drenagem das bacias estão no Quadro 5. Observa-se que os valores : menor, maior e médio de Rb, Rlw e Rl são os seguinte: 3,1667, 3,75 e 3,4; 1,4441, 2,5445 e 2,0078 e 1,8685, 2,0665 e 1,8713, respectivamente. Esses resultados estão coerentes com a relação entre a infiltração e o deflúvio e, concordam com Silva (2001) que obteve, para o mesmo solo (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrúptico A moderado textura arenosa/média ou argilosa relevo ondulado), da Área III da Bacia do Córrego da Onça, no município de Presidente Prudente, os seguintes valores médios referentes a 11 bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação: Rb 3,303; Rlw 2,340 e Rl 1,862.

As equações obtidas relacionando os logaritmos dos números, comprimentos totais e comprimentos médios de segmentos de rios com as ordens de ramificação, propostas por Maxwell (1955), França (1968) e Vasques Filho (1972), respectivamente, para as bacias hidrográficas estudadas estão contidas no Quadro 6 e suas representações gráficas na Figura 16. Essas equações forneceram valores do teste t para b e do teste F para a regressão significativos a 1% de probabilidade, demonstrando a dependência dos parâmetros: número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios com as ordens de ramificação.

Quadro 5 – Valores de razões de ramificação (Rb), comprimento total (Rlw) e comprimento médio (Rl) da rede de drenagem das bacias hidrográficas estudadas

Bacias	Rb			Rlw			Rl		
N^0	Ordens relacionadas		média	Ordens relacionadas		média	Ordens relacionadas		média
	w_1 / w_2	w_2 / w_3		w_1 / w_2	w_2 / w_3		w_3 / w_2	w_2 / w_1	
1	3,3333	3,0000	3,1667	2,5405	2,4667	2,5036	1,2163	1,3120	1,2642
2	4,0000	3,0000	3,5000	2,0889	3,0000	2,5445	1,0000	1,9151	1,4576
3	3,6667	3,0000	3,3334	2,0588	0,8293	1,4441	3,6179	1,7811	2,6995
4	4,5000	2,0000	3,2500	1,7692	1,2581	1,5137	1,5897	2,5432	2,0665
5	5,5000	2,0000	3,7500	1,9792	2,0870	2,0331	0,9583	2,7786	1,8685
média			3,4000			2,0078			1,8713
Desvio padrão			0,2312			0,5235			0,5621
CV %			6,8000			26,0700			30,0400

Quadro 6 – Equações ajustadas para número (Nw), comprimento total (Lw) e médio (Lmw) de segmentos de rios para as bacias hidrográficas estudadas

Equação	r	r^2	tb	F	antilog B
Log Nw = 1,4999 – 0,5116w	- 0,9845	0,9693	**	**	Rb 3,2479
Log Lw = 0,7901 – 0,2790w	- 0,8967	0,8041	**	**	Rlw 1,9011
Log Lmw = - 0,7197 + 0,2362w	0,8274	0,6846	**	**	Rl 1,7227

Coeficientes: r – Correlação; r^2 – determinação; tb – teste t para b; F – teste para a regressão.
**significativo a 1%.

O ajuste das equações, ou seja, a significância estatística, demonstra a dependência dos parâmetros número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios com as ordens de ramificação, indicando que a rede de drenagem segue as Leis hidrofísicas de Horton (1945) para número e comprimento médio e de Strahler (1957) para comprimento total, indicando segundo esses autores, que o desenvolvimento da rede de drenagem se faz em equilíbrio com o ambiente.

Vários autores, dentre eles: França (1968), Vasques Filho (1972), Carvalho (1977, 1981), Carvalho et al., (1992), Azevedo (1999), Silva (2001), verificaram que quando a composição da rede de drenagem de bacias de 3ª ordem de ramificação obedece as Leis hidrofísicas, não está ocorrendo desequilíbrio no ambiente em termos de erosão acelerada e nem controle da rede de drenagem pela rocha subjacente, indicando neste caso a existência de solos profundos.

Nas equações ajustadas, b é a inclinação da linha de regressão e fornece valores médios da variação dos números, comprimentos totais e comprimentos médios em relação às ordens de ramificação, constituindo uma maneira de se obter as razões de ramificação (Maxwell, 1955), de comprimento total (França, 1968) e comprimento médio (Vasques Filho, 1972).

Os valores das razões obtidas através do antilog de b das equações para as bacias hidrográficas foram os seguintes: razão de ramificação (Rb) 3,2479, razão de comprimento total (Rlw) 1,9011 e razão de comprimento total (Rl) 1,7227, Quadro 6, concordando com Silva (2001).

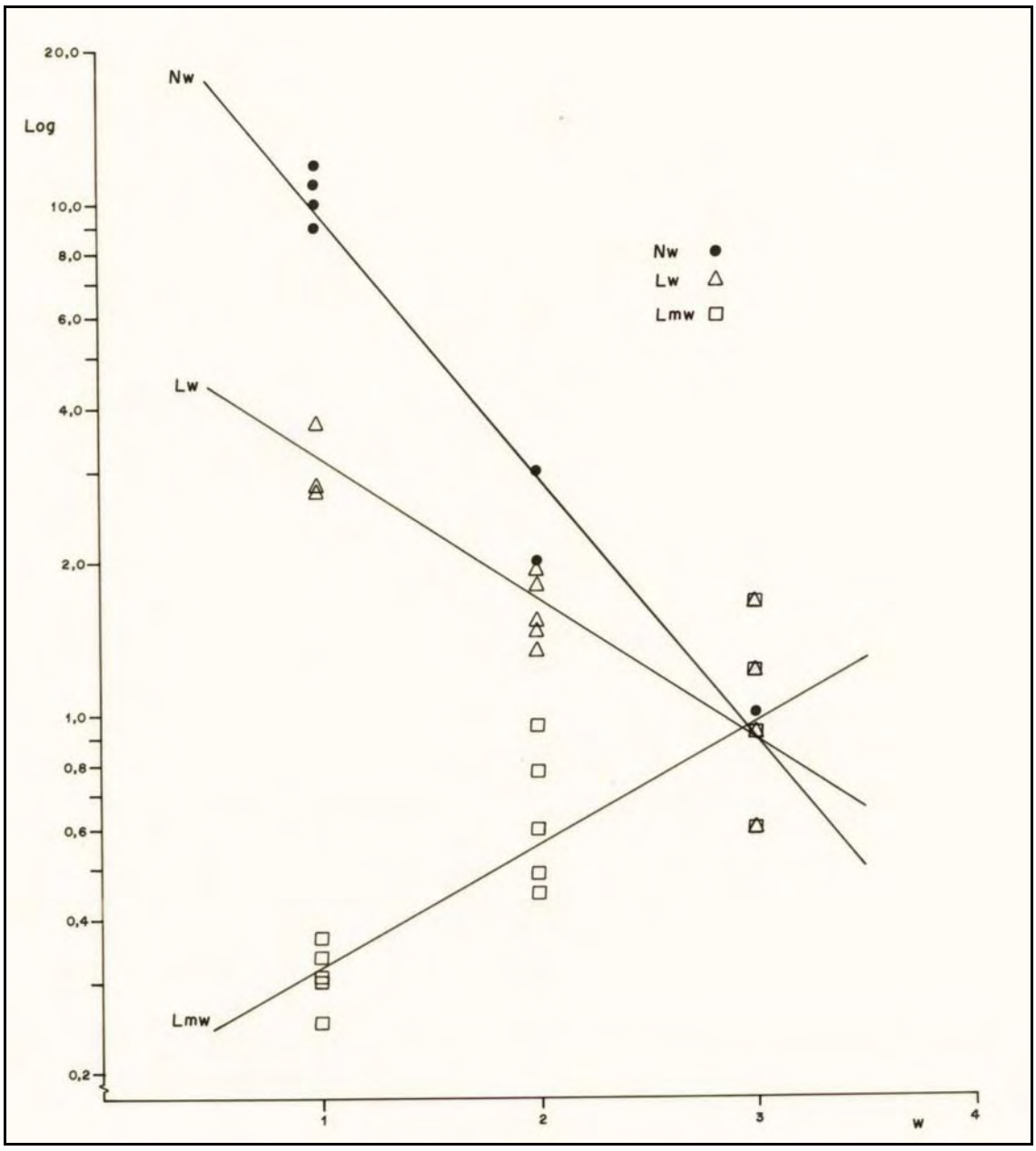


Figura 16 - Regressões dos números (Nw), comprimentos totais (Lw) e comprimentos médios (Lmw) de segmentos de rios sobre as ordens de ramificação (w) para o solo estudado.

A razão de ramificação e a razão de comprimento total indicam em média o quanto aumenta o número e o comprimento total de segmentos de rios da ordem mais elevada para a menos elevada, respectivamente, e a razão de comprimento médio o quanto aumenta o comprimento médio de segmentos de rios ao se passar da ordem menos elevada para a mais elevada. Por exemplo, se o Rb é igual a 3 para uma bacia de 3ª ordem de ramificação, a ordem mais elevada tem 1 segmento de rio, e o de 2ª ordem tem 1x Rb, ou seja 3 segmentos de rios de 2ª ordem e 3x Rb, ou seja 9 segmentos de rios de 1ª ordem.

A Figura 16 mostra que o número e o comprimento total de segmentos de rios são inversamente proporcionais às ordens de ramificação e, o comprimento médio de segmentos de rios é diretamente proporcional às ordens de ramificação.

A área de Argissolo tem como uso atual a pastagem (Quadro 1) que se instalou nos três municípios, na década de 70, e vem substituindo, a agricultura pela pecuária. Este fato pode ser observado através do Quadro 7, cuja a fonte é a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - FIBGE, que mostra a evolução do uso do solo nos municípios de Marabá Paulista, Presidente Bernardes e Santo Anastácio, onde foram amostradas as bacias hidrográficas, podendo-se notar que mais de 80% das áreas desses municípios são ocupadas com pastagem, desde 1975.

O gradiente textural, textura arenosa no horizonte A e/ou E, e média no horizonte B, aliado a mudança textural abrupta e ao relevo ondulado tornam os Argissolos suscetíveis à erosão. Todavia, o uso com pastagem há mais de vinte anos (Quadro 7) está reduzindo e/ou controlando a erosão, principalmente a laminar e em sulcos que em suas evoluções transformam-se em canais de drenagem aumentando o número e rios (Azevedo, 1999), e conseqüentemente desorganizando a hierarquia do sistema de drenagem (Silva, 2001); uma vez que foi observada a aplicação das Leis hidrofísicas.

As gramíneas por possuírem raízes fasciculadas induzem a agregação e dão estabilidade à estrutura do solo o que, aliado ao sistema foliar que permite a cobertura total do terreno, torna o solo menos suscetível à erosão.

Quadro 7 - Uso do solo nos municípios de Marabá Paulista, Presidente Bernardes e Santo Anastácio em vários períodos, área e porcentagem de cada tipo de uso em relação ao total

Uso do Solo	1970		1975		1980		1996	
	Área(ha)	%	Área(ha)	%	Área(ha)	%	Área(ha)	%
Município: Marabá Paulista								
Lavouras	8438	10,0	6674	8,0	7706	9,0	7175	9,0
Pastagens	64792	82,0	72473	88,0	70880	84,0	66821	85,0
Matas e Florestas	2173	3,0	2166	3,0	4987	6,0	4044	5,0
Terras produtivas não utilizadas	3918	5,0	999	1,0	903	1,0	31	0,4
Total	79321	100,0	82312	100,0	84476	100,0	78071	100,0
Município: Pres. Bernardes								
Lavouras	20174	30,0	12367	15,0	13421	16,0	10451	14,0
Pastagens	42985	66,0	64968	80,6	67334	81,4	61450	82,0
Matas e florestas	2795	4,0	3042	4,0	2375	3,0	2855	4,0
Terras produtivas não utilizadas	594	0,5	301	0,4	507	0,6	37	*
Total	66548	100,0	80777	100,0	83637	100,0	19488	100,0
Município: Santo Anastácio								
Lavouras	14784	23,0	11357	16,0	12619	17,0	5728	8,0
Pastagens	46189	72,0	60256	82,0	60825	81,0	61680	89,0
Matas e florestas	1823	3,0	1235	1,4	1475	1,8	2177	3,0
Terras produtivas não utilizadas	1560	2,0	410	0,6	143	0,2	29	*
Total	64356	100,0	73258	100,0	75062	100,0	69614	100,0

* menor que 0,05 %

Fonte: Censo Agropecuário - IBGE

A composição da rede de drenagem das bacias estudadas está caracterizada no Quadro 8, com valores de número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios, obtidos através da média aritmética; média ponderada em relação às áreas das bacias, e calculados: utilizando as equações obtidas (Quadro 6); por aplicação das Leis hidrofísicas, ou seja através das razões obtidas pelo antilog de b das equações ajustadas. Para o número e comprimento total de segmentos de rios, os valores seguem uma progressão geométrica inversa às ordens de ramificação, cujas razões são as de ramificação (Rb) e de comprimentos totais (Rlw), respectivamente. Os valores de comprimento médio de segmentos de rios seguem uma progressão geométrica direta às ordens de ramificação, na qual o primeiro termo é o comprimento médio de rios de 1ª ordem e cuja razão, é a razão de comprimento médio (Rl).

A aplicação das Leis hidrofísicas através do ajuste das equações para os parâmetros da composição da rede de drenagem, provavelmente, é devido a adequação do uso do solo com os elementos do ambiente.

Quadro 8 - Número (Nw), comprimento total (Lw) e comprimento médio (Lmw) em cada ordem de ramificação (w) e o total observado e calculado para as bacias hidrográficas estudadas

Ordem (w)	Número de Segmentos de Rios - Nw			
	Observado		Calculado	
	Média Aritmética	Média Ponderada	Maxwell (Equação)	Horton (Lei)*
1ª	10,6000	10,6008	9,7342	10,5489
2ª	2,6000	2,6311	2,9971	3,2479
3ª	1,0000	1,0000	0,9228	1,0000
Total	14,2000	14,2319	13,6541	14,7968

Ordem (w)	Comprimento Total de Segmentos de Rios - Lw (km)			
	Observado		Calculado	
	Média Aritmética	Média Ponderada	França (Equação)	Strahler (Lei)**
1ª	3,3760	3,4000	3,2441	3,5184
2ª	1,6240	1,6193	1,7065	1,8507
3ª	1,0000	0,9735	0,8976	0,9735
Total	6,0000	5,9928	5,8482	6,3426

Ordem (w)	Comprimento Médio de Segmentos de rios - Lmw (km)			
	Observado		Calculado	
	Média Aritmética	Média Ponderada	Vasques Filho (Equação)	Horton (Lei)***
1ª	0,3192	0,3164	0,3285	0,3164
2ª	0,6573	0,6452	0,5658	0,5451
3ª	1,0000	0,9735	0,9748	0,9390
Total	1,9765	1,9351	1,8691	1,8005

* Média dos números de segmentos de rios de 3ª ordem e Rb antilog b da equação.

** Média ponderada dos comprimentos totais de segmentos de rios de 3ª ordem e Rlw antilog b da equação.

*** Média ponderada dos comprimentos médios de segmentos de rios de 1ª ordem e Rl antilog b da equação.

6.2.2 Padrão de drenagem

O padrão de drenagem é o resultado do trabalho das águas que atingem, penetram e se escoam pela superfície do terreno.

As características quantitativas do padrão de drenagem e a classe de textura topográfica, para as bacias hidrográficas representativas do Argissolo, são apresentadas no Quadro 9.

Os valores mínimos, máximos e médios encontrados para os índices freqüência de rios, densidade de drenagem e razão de textura foram os seguintes: Fr - 3,5842; 5,0691 e 4,4914, Dd – 2,0932; 3,0599 e 2,5462, T – 1,3158; 1,8968 e 1,6315, respectivamente. Esses valores refletem a influência do fator solo no desenvolvimento da rede de drenagem e, concordam com os encontrados por França (1968) e Carvalho (1981); Carvalho et al., (1990), dentre outros, no sentido de se utilizar a freqüência de rios e a densidade de drenagem para expressar quantitativamente o grau de desenvolvimento das redes de drenagem, pois relacionam o número e o comprimento total de rios às áreas das bacias.

Os coeficientes de variação de 14,27% para a freqüência de rios, 13,56% para a densidade de drenagem e 15,52% para a razão de textura, são considerados médios; todavia, o maior valor encontrado para a razão de textura provavelmente é devido este índice relacionar o número total de rios com o perímetro das bacias, uma vez que áreas diferentes podem ter perímetros iguais, pois este depende da forma.

Segundo França (1968) a densidade de drenagem pode ser interpretada como baixa (<1,5), média (1,5 a 2,5) e alta (>2,5). Assim, de acordo com o valor médio observado, a densidade de drenagem é alta, refletindo a natureza, as características do Argissolo e o relevo ondulado, indicando que o deflúvio é maior que a infiltração de água no solo.

A razão de textura média ponderada em relação à área das bacias (Tm), 1,6215, classifica a textura topográfica em grosseira, concordando com Carvalho (1995).

Quadro 9 – Índices do padrão de drenagem e classe de textura topográfica das bacias hidrográficas estudadas

Bacia n^0	Freqüência de Rios (Fr)*	Densidade de Drenagem (Dd)**	Razão de Textura (T)***	Razão de Textura Média (Tm)****	Classe de Textura Topográfica
1	3,5842	2,0932	1,3158		
2	4,8387	2,4839	1,8968		
3	4,9107	2,5893	1,7628		
4	4,0541	2,5045	1,4063		
5	5,0691	3,0599	1,7857	1,6215	Grosseira
Média	4,4914	2,5462	1,6315		
Desvio Padrão	0,6412	0,3452	0,2533		
CV%	14,2700	13,5600	15,5200		

* - número de rios/km^2; ** - km de rios/km^2; *** - número de rios/km.

6.3 Análise do Relevo

No quadro 10 são apresentadas as características do relevo das bacias estudadas, onde se pode verificar que os valores médios de maior altitude, menor altitude, altitude média, amplitude altimétrica e razão de relevo são os seguintes: 453,4; 367,8; 410,4; 86,0 e 0,038 respectivamente. Os coeficientes de variação dos dados em relação às médias são considerados médios para os parâmetros, amplitude altimétrica e razão de relevo e baixos para os demais.

Não foi observada variação muito contrastante dos parâmetros maior e menor altitude, altitude média e amplitude altimétrica das bacias, provavelmente devido a área estudada estar localizada no Planalto Ocidental Paulista e assentada sobre arenitos de formação plano-paralela.

A relação entre a amplitude altimétrica e o maior comprimento da bacia resulta no índice razão de relevo, sendo que, quanto maior for o seu valor, mais acidentado é o relevo (Schumm, 1956). Segundo Strahler (1957), a razão de relevo indica o declive total da superfície da bacia. Todavia, a razão de relevo é um parâmetro que reflete o relevo em apenas um determinado trecho da bacia, e, portanto, não reflete o relevo como um todo na área circunscrita pelo divisor d'água, Azevedo (1999).

Quadro 10 - Características do relevo das bacias hidrográficas estudadas

Bacia	Maior altitude **MA**	Menor altitude **mA**	Altitude média **Hm**	Amplitude altimétrica **H**	Razão de relevo **Rr**
	(m)				
1	461,0000	357,0000	409,0000	104,0000	0,0361
2	446,0000	358,0000	402,0000	88,0000	0,0440
3	446,0000	350,0000	398,0000	96,0000	0,0466
4	463,0000	387,0000	424,0000	78,0000	0,0333
5	451,0000	387,0000	419,0000	64,0000	0,0299
Média	**453,4000**	**367,8000**	**410,4000**	**86,0000**	**0,0380**
Desvio padrão	8,1425	17,7961	11,0136	15,6205	0,0071
CV %	1,7959	4,8385	2,6836	18,1634	18,6768

6.4 Análise Fractal

6.4.1 Rede de drenagem

O termo fractal designa objetos e estruturas complexas que apresentam detalhes, ramificações, poros ou rugosidades e, cuja Dimensão Fractal é a mesma em diferentes escalas.

A maior parte dos fenômenos naturais apresenta comportamento não linear, capaz de gerar padrões bastante complexos para serem adequadamente descritos pela geometria Euclidiana que se baseia em objetos regulares, e diferenciáveis, sendo que os conjuntos na geometria Euclidiana são descritos por equações algébricas. Uma alternativa que minimiza as limitações presentes na descrição clássica dos fenômenos irregulares da natureza é a geometria fractal que é descrita por algoritmos recursivos.

Alguns autores verificaram que as bacias hidrográficas apresentam dimensão fractal característica, pois esta depende das condições ambientais do sistema hidrográfico.

O indicador do comportamento fractal das bacias hidrográficas verificados por Mandelbrot (1977) foi a dependência do comprimento do rio principal com a área da bacia.

A dimensão fractal (D) pode apresentar, ao contrário da dimensão Euclidiana (d), valores fracionários que dependem do sistema: $0<D<1$, para uma curva;$1<D<2$, para superfície e $2<D<3$, para um sólido. Esse valor é uma medida de proporção do espaço realmente ocupado por uma estrutura desordenada.

A Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área, com onze repetições, para as bacias hidrográficas representativas do Argissolo é mostrada no Quadro 11.

Os valores médios de onze repetições da Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem para as bacias hidrográficas 1, 2, 3, 4 e 5 ,e o valor médio total são os seguintes: 1,3087; 1,4038; 1,3269; 1,2934; 1,3657 e 1,3397, respectivamente.

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) obtidos para o Perímetro das bacias hidrográficas 1, 2, 3, 4; 5 e o valor médio total são os seguintes: 1,2819; 1,2815; 1,2840; 1,2648; 1,3021 e 1,2829, respectivamente.

Para a Dimensão Fractal (D) da Área das bacias hidrográficas, 1, 2, 3, 4 e 5, os valores médios obtidos são os seguintes: 1,8747; 1,9052; 1,9239; 1,8564 e 1,9027, respectivamente e o valor médio total para as bacias é 1,8926.

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área das bacias 1, 2, 3, 4 e 5 são os seguintes: 1,4884; 1,5302; 1,5116; 1,4715 e 1,5235, respectivamente, e a média total obtida com 165 dados é 1,5050.

Quadro 11 – Dimensão fractal da composição da rede de drenagem, perímetro e área das bacias hidrográficas estudadas

Repetição	Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4	Bacia 5	Média Total
	Composição da Rede de Drenagem					
1	1,3128	1,4053	1,3339	1,2973	1,3708	
2	1,2986	1,4104	1,3244	1,2820	1,3627	
3	1,3106	1,3999	1,3164	1,2861	1,3667	
4	1,3075	1,4035	1,3205	1,2902	1,3668	
5	1,3105	1,4022	1,3302	1,2932	1,3565	
6	1,3093	1,4166	1,3208	1,2912	1,3727	
7	1,3057	1,4068	1,3388	1,2973	1,3642	
8	1,3088	1,4088	1,3245	1,2984	1,3624	
9	1,3157	1,3981	1,3320	1,2992	1,3701	
10	1,3070	1,3963	1,3283	1,2982	1,3662	
11	1,3092	1,3944	1,3263	1,2942	1,3642	
Média	**1,3087**	**1,4038**	**1,3269**	**1,2934**	**1,3657**	**1,3397**
	Perímetro					
1	1,2802	1,2800	1,2895	1,2635	1,3036	
2	1,2805	1,2825	1,2838	1,2616	1,3018	
3	1,2786	1,2747	1,2881	1,2617	1,2999	
4	1,2875	1,2815	1,2841	1,2671	1,3037	
5	1,2831	1,2818	1,2837	1,2653	1,2981	
6	1,2817	1,2765	1,2859	1,2668	1,2981	
7	1,2787	1,2777	1,2805	1,2671	1,3018	
8	1,2850	1,2830	1,2840	1,2609	1,3000	
9	1,2801	1,2899	1,2804	1,2653	1,3071	
10	1,2865	1,2813	1,2823	1,2651	1,3037	
11	1,2786	1,2882	1,2822	1,2685	1,3054	
Média	**1,2819**	**1,2816**	**1,2840**	**1,2648**	**1,3021**	**1,2829**
	Área					
1	1,8669	1,8983	1,9572	1,8643	1,9111	
2	1,8744	1,9061	1,9516	1,8566	1,9051	
3	1,8790	1,9000	1,9494	1,8517	1,9060	
4	1,8745	1,9082	1,9576	1,8536	1,8947	
5	1,8803	1,9144	1,9512	1,8576	1,9003	
6	1,8742	1,8855	1,8840	1,8529	1,8949	
7	1,8749	1,9013	1,9445	1,8587	1,9058	
8	1,8657	1,9092	1,8941	1,8541	1,9108	
9	1,8733	1,9086	1,8891	1,8569	1,9117	
10	1,8767	1,9159	1,8900	1,8611	1,8947	
11	1,8819	1,9098	1,8943	1,8527	1,8944	
Média	**1,8747**	**1,9052**	**1,9239**	**1,8564**	**1,9027**	**1,8926**
Média Total	**1,4884**	1,**5302**	**1,5116**	**1,4715**	**1,5235**	**1,5050**

Os valores do Quadro 11 foram obtidos pelo método SPA - BOX, os quais permitiram a determinação das dimensões fractais, utilizando-se as malhas recomendadas (2,0mm $_{x}$ 2,0mm), as quais foram superpostas às bacias, Figura 2, sendo que a contagem das caixas, para a determinação da Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem foi sobre a rede de drenagem, Figura 4, e do Perímetro a contagem das caixas foi feita no contorno do divisor d'águas das bacias, Figura 3, e para a determinação da Dimensão Fractal (D) da Área a contagem das caixas foi feita dentro da área circunscrita pelo divisor d'águas das bacias (Figura 3).

Os 165 valores de Dimensão Fractal (D) obtidos (Quadro 11) variaram entre 1,2609 a 1,9576, o que evidencia a fractalidade das bacias em relação à Composição da Rede de Drenagem (número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios), Perímetro e Área (bacia: maior comprimento, maior largura, comprimento do rio principal, comprimento total da rede, perímetro e área; padrão de drenagem: densidade de drenagem, freqüência de rios, razão de textura, razão de textura média e classe de textura topográfica), concordando com Harrison (1992) que considera que a dimensão Fractal (D) para o sistema de "Superfície", utilizado nesta pesquisa, pode variar entre 1 e 2 ($1<D<2$) e com Gomes (1997) que verificou que as redes de canais naturais têm Dimensão Fractal (D), geralmente entre 1,5 e 2.

Os resultados da análise de variância referentes a Dimensão Fractal (D) da composição da rede de drenagem para as bacias hidrográficas estão no Quadro 12, e mostram que a Dimensão Fractal (D) é estatisticamente diferente para as bacias, 1, 2, 3, 4 e 5, a 1% de probabilidade, sendo que o coeficiente de variação dos 55 dados (5 bacias $_{x}$ 11 repetições) em relação à média, 1,3397, é de 0,42%, sendo considerado baixo (Gomes, 1987), o que leva a crer que a obtenção dos dados foi bem criteriosa.

Quadro 12 – Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes à composição da rede de drenagem para as bacias hidrográficas (tratamento)

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Bacia	4	0,08868621	0,02217155	704,13**
Resíduo	50	0,00157440	0,00003149	
Total	54	0,09026061		
	CV = 0,42%		média = 1,3397	

** Significativo a 1% de probabilidade.

O Quadro 13 apresenta comparações das médias da Dimensão Fractal (D) da composição da rede de drenagem, onde se pode verificar que os valores médios das bacias hidrográficas diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Quadro 13 – Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes à composição da rede de drenagem para as bacias hidrográficas

Dimensão Fractal (D)					
Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4	Bacia 5	DMS*
1,3087 d	1,4038 a	1,3269 c	1,2934 e	1,3657 b	0,0068

* DMS – Diferença mínima significativa.
Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) do Perímetro para as bacias hidrográficas encontram-se no Quadro 14. A Dimensão Fractal (D) foi significativa a 1% de probabilidade para as bacias hidrográficas. O coeficiente de variação dos dados (55) em relação à média, 1,2829, é de 0,26%, sendo considerado valor baixo.

Quadro 14 – Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes ao perímetro para as bacias hidrográficas (tratamento)

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Bacia	4	0,00770510	0,00192628	177,42**
Resíduo	50	0,00054286	0,00001086	
Total	54	0,00824796		
	CV = 0,26%		média = 1,2829	

** Significativo a 1% de probabilidade.

O Quadro 15 apresenta os resultados do teste de Tukey aplicado às médias da Dimensão Fractal (D) do Perímetro para as bacias hidrográficas, onde se pode verificar que as bacias 4 e 5 diferem estatisticamente entre si e das demais, a 5% de probabilidade, e as bacias 1, 2 e 3 são iguais. Esses resultados, provavelmente são devidos ao perímetro variar não só com a área da bacia, mas também ser influenciado pela forma do divisor d'águas.

Quadro 15 – Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes ao perímetro para as bacias hidrográficas

Dimensão Fractal (D)					
Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4	Bacia 5	DMS*
1,2819 b	1,2815 b	1,2840 b	1,2648 c	1,3021 a	0,004

* DMS – Diferença mínima significativa.
Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A análise de variância da Dimensão Fractal (D) referente à Área para as bacias hidrográficas apresentou significância estatística a 1% de probabilidade, indicando que as bacias diferem em relação a Dimensão Fractal (D) da Área. O coeficiente de variação dos dados (55) em relação à média, 1,8926 é de 0,83%, sendo considerado valor baixo, Quadro 16.

Quadro 16 – Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes a área para as bacias hidrográficas (tratamento)

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Bacia	4	0,03160003	0,00790001	32,39**
Resíduo	50	0,01219334	0,00024387	
Total	54	0,04379337		
	CV = 0,83%		média = 1,8926	

** Significativo a 1% de probabilidade.

O Quadro 17 apresenta a comparação das médias da Dimensão Fractal (D) da área para as bacias hidrográficas pelo teste de Tukey. Observa-se que a bacia 3 difere estatisticamente das demais a 5% de probabilidade; e que as bacias 2 e 5 são iguais e diferem, estatisticamente a 5% de probabilidade, das bacias 1 e 4 que são iguais.

Quadro 17 – Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes a área para as bacias hidrográficas

Dimensão Fractal (D)					
Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4	Bacia 5	DMS*
1,8747 c	1,9027 b	1,9239 a	1,8564 c	1,9027 b	0,0188

* DMS – Diferença mínima significativa.
Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os resultados da análise de variância global que considerou a Dimensão Fractal (D) de 3 parâmetros: Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área (tratamento A) e as bacias hidrográficas (tratamento B), estão no Quadro 18, e mostram que a análise é estatisticamente significativa a 1% de probabilidade, indicando que a Dimensão Fractal (D) da composição da rede de drenagem, perímetro e área diferem entre si e para as bacias hidrográficas. O coeficiente de variação dos 165 dados (3 parâmetros $_{x}$ 5 bacias $_{x}$ 11 repetições) em relação à média, 1,5050, é de 0,65%, considerado baixo (Gomes, 1987).

Quadro 18 – Resultados da análise de variância da Dimensão fractal (D) das bacias hidrográficas (tratamento B); composição da rede de drenagem; perímetro e área (tratamento A)

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento AxB	14	12,60598566	0,90042755	9438,05**
Resíduo	150	0,01431060	0,00009540	
Total	164	12,62029626		
	CV = 0,65%			média = 1,5050

** Significativo a 1% de probabilidade.

O Quadro 19 apresenta a comparação das médias da Dimensão Fractal (D) referente às bacias para a Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área, onde se pode verificar que a Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, indicando que esses parâmetros são importantes para definir a fractalidade das bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação representativas do Argissolo.

Quadro 19 – Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes às bacias hidrográficas para a composição da rede de drenagem, perímetro e área

	Dimensão Fractal		
Composição da Rede	Perímetro	Área	DMS*
1,3397 b	1,2829 c	1,8926 a	0,0044

* DMS – Diferença mínima significativa.
Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A comparação das médias da Dimensão Fractal (D) referentes à Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área para as bacias hidrográficas estão no Quadro 20, onde se pode verificar que a Dimensão Fractal (D) dos três parâmetros, em conjunto, diferem para as bacias, estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, concordando com Mandelbrot (1983) que considera que estruturas auto-similares apresentam

detalhes, ramificações, rugosidades em certa faixa de escala de comprimento, cuja forma é a mesma em diferentes escalas.

Quadro 20 – Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes à composição da rede de drenagem, perímetro e área para as bacias hidrográficas

Dimensão Fractal (D)					
Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4	Bacia 5	DMS*
1,4884 d	1,5302 a	1,5116 c	1,4715 e	1,5235 b	0,0066

* DMS – Diferença mínima significativa.
Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Todavia, os valores obtidos de Dimensão Fractal (D) para os três parâmetros, através do SPA - BOX mostrou diferenças para as bacias, que apresentam pequena perda de similaridade geométrica (França, 1968) variando de 0,02 e 0,30 (Quadro 3), mostrando que a Dimensão Fractal (D) é sensível para refletir essa perda de similaridade das bacias e que na natureza os padrões são similares e não iguais.

6.4.2 Relevo

O relevo diz respeito às formas de terreno que compõem uma paisagem sendo caracterizado por formas salientes e formas deprimidas. Uma das formas de representar o relevo é através do processo das curvas de nível que são linhas fechadas, que ligam entre si pontos de igual altitude (isoípsas) ou de igual profundidade (isóbatas). As representações gráficas de uma depressão e uma elevação são semelhantes, diferindo, no entanto, quanto à numeração. As curvas de nível permitem verificar, através da distância horizontal entre elas, o declive e a forma das vertentes, que agem sobre a dinâmica d'água quer no sentido vertical (infiltração) e/ou lateral (deflúvio).

As curvas de nível nas cotas mais altas indicam a presença de pequenos canais de drenagem intermitentes, que geralmente não são representados nos mapas topográficos, mas que são identificados através das inflexões ou crênulas das curvas de nível, apontadas para o divisor d'água das bacias.

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) obtidos para as curvas de nível comuns às bacias hidrográficas estudadas, cotas de 440; 430; 420; 410; 400 e 390 metros, estão no Quadro 21, onde se verifica que os valores médios, de onze repetições para cada cota e a média total dessas cotas para as bacias são os seguintes: bacia 1: 1,2148; 1,1459 1,3036 1,3186; 1,3577; 1,3263 e 1,2778, bacia 2: 1,1362; 1,1717; 1,2187; 1,2432; 1,3567; 1,3704 e 1,2495, bacia 3: 1,2098; 1,1477; 1,2467; 1,2343; 1,2805; 1,2552, e 1,2290, bacia 4: 1,2460; 1,2566; 1,3097; 1,3144; 1,3377; 1,3757 e 1,3067, bacia 5: 1,2336; 1,2157; 1,2626; 1,2774; 1,3059; 1,3175 e 1,2688, respectivamente.

Os valores médios totais da Dimensão Fractal (D) das cotas 440; 430; 420; 410; 400 e 390 metros para as bacias 1, 2, 3, 4 e 5 são os seguintes: 1,2081; 1,1885; 1,2683; 1,2776; 1,3277; e 1,3290, respectivamente, e a média total obtida com 330 dados é 1,2664.

Esses valores evidenciam a fractalidade das bacias em relação ao relevo, o qual demonstra fractalidade através das curvas de nível, pois o sistema utilizado foi o de “Superfície”, onde a Dimensão Fractal (D) pode variar entre 1 e 2 ($1<D<2$), Spadotto & Serapfim (1998).

Quadro 21 – Dimensão Fractal (D) das curvas de nível comuns às bacias hidrográficas estudadas

	Curvas de Nível – Cotas (m)						
Amostras	**440**	**430**	**420**	**410**	**400**	**390**	**Média Total**
			Bacia Hidrográfica 1				
1	1,2040	1,1480	1,3041	1,3196	1,3529	1,3281	
2	1,2186	1,1480	1,3068	1,3115	1,3583	1,3212	
3	1,2186	1,1484	1,3068	1,3136	1,3583	1,3286	
4	1,2186	1,1442	1,3009	1,3136	1,3583	1,3296	
5	1,2186	1,1407	1,3065	1,3136	1,3554	1,3212	
6	1,2186	1,1499	1,3098	1,3196	1,3556	1,3212	
7	1,2213	1,1470	1,2939	1,3166	1,3578	1,3254	
8	1,2186	1,1442	1,3041	1,3166	1,3556	1,3282	
9	1,2186	1,1471	1,3068	1,3268	1,3609	1,3282	
10	1,2039	1,1471	1,3037	1,3238	1,3609	1,3254	
11	1,2039	1,1338	1,2966	1,3298	1,3609	1,3323	
Média	**1,2148**	**1,1459**	**1,3036**	**1,3186**	**1,3577**	**1,3263**	**1,2778**
			Bacia Hidrográfica 2				
1	1,1341	1,1745	1,2158	1,2452	1,3533	1,3700	
2	1,1341	1,1745	1,2187	1,2418	1,3502	1,3790	
3	1,1339	1,1745	1,2127	1,2441	1,3564	1,3701	
4	1,1341	1,1790	1,2194	1,2418	1,3595	1,3701	
5	1,1341	1,1753	1,2187	1,2404	1,3594	1,3746	
6	1,1341	1,1787	1,2187	1,2452	1,3595	1,3700	
7	1,1341	1,1787	1,2107	1,2451	1,3595	1,3700	
8	1,1341	1,1659	1,2187	1,2407	1,3540	1,3700	
9	1,1400	1,1659	1,2235	1,2407	1,3536	1,3701	
10	1,1400	1,1615	1,2217	1,2417	1,3594	1,3655	
11	1,1457	1,1600	1,2275	1,2485	1,3594	1,3655	
Média	**1,1362**	**1,1717**	**1,2187**	**1,2432**	**1,3567**	**1,3704**	**1,2495**
			Bacia Hidrográfica 3				
1	1,2098	1,1477	1,2440	1,2370	1,2810	1,2590	
2	1,2098	1,1476	1,2440	1,2389	1,2870	1,2590	
3	1,2098	1,1477	1,2440	1,2389	1,2810	1,2590	
4	1,2098	1,1477	1,2440	1,2337	1,2821	1,2511	
5	1,2098	1,1477	1,2440	1,2389	1,2840	1,2550	
6	1,2098	1,1466	1,2440	1,2305	1,2840	1,2550	
7	1,2097	1,1476	1,2421	1,2389	1,2748	1,2550	
8	1,2098	1,1477	1,2498	1,2384	1,2748	1,2551	
9	1,2098	1,1493	1,2535	1,2304	1,2703	1,2551	
10	1,2097	1,1476	1,2535	1,2289	1,2741	1,2550	
11	1,2097	1,1477	1,2513	1,2232	1,2929	1,2487	
Média	**1,2098**	**1,1477**	**1,2467**	**1,2343**	**1,2805**	**1,2552**	**1,2290**

Quadro 21 - Continuação

Amostras	440	430	420	410	400	390	Média Total
			Bacia Hidrográfica 4				
1	1,2421	1,2516	1,3044	1,3146	1,3380	1,3750	
2	1,2421	1,2556	1,3048	1,3182	1,3350	1,3749	
3	1,2421	1,2557	1,3048	1,3182	1,3350	1,3768	
4	1,2421	1,2512	1,3029	1,3182	1,3310	1,3750	
5	1,2421	1,2530	1,3093	1,3182	1,3381	1,3750	
6	1,2421	1,2512	1,3093	1,3182	1,3381	1,3751	
7	1,2421	1,2530	1,3167	1,3182	1,3309	1,3749	
8	1,2421	1,2537	1,3181	1,3146	1,3380	1,3749	
9	1,2582	1,2621	1,3181	1,3057	1,3380	1,3832	
10	1,2592	1,2680	1,3197	1,3057	1,3481	1,3832	
11	1,2515	1,2680	1,2981	1,3085	1,3450	1,3647	
Média	**1,2460**	**1,2566**	**1,3097**	**1,3144**	**1,3377**	**1,3757**	**1,3067**
			Bacia Hidrográfica 5				
1	1,2337	1,2149	1,2601	1,2787	1,3105	1,3274	
2	1,2389	1,2149	1,2668	1,2761	1,3105	1,3274	
3	1,2389	1,2199	1,2625	1,2760	1,3105	1,3249	
4	1,2337	1,2199	1,2668	1,2760	1,3105	1,3250	
5	1,2356	1,2199	1,2668	1,2724	1,3106	1,3250	
6	1,2347	1,2149	1,2668	1,2761	1,3105	1,3191	
7	1,2377	1,2200	1,2626	1,2787	1,3106	1,3155	
8	1,2304	1,2043	1,2750	1,2761	1,3105	1,3155	
9	1,2294	1,2043	1,2539	1,2715	1,2934	1,3191	
10	1,2294	1,2200	1,2539	1,2849	1,2934	1,2966	
11	1,2274	1,2200	1,2539	1,2849	1,2934	1,2966	
Média	**1,2336**	**1,2157**	**1,2626**	**1,2774**	**1,3059**	**1,3175**	**1,2688**
Média Total	**1,2081**	**1,1875**	**1,2683**	**1,2776**	**1,3277**	**1,3290**	**1,2664**

Os resultados das análises de variância da Dimensão Fractal (D) referentes às curvas de nível, cotas de 440; 430; 420; 410; 400 e 390m para as bacias hidrográficas estão no Quadro 22 e mostram significância estatística a 1% de probabilidade. As médias de 55 dados (5 bacias $_{x}$ 11 repetições) e os coeficientes de variação dos dados em relação às médias das cotas 440; 430; 420; 410; 400 e 390 são os seguintes: 1,2081 e 0,42%; 1,1875 e 0,46%; 1,2683% e 0,45%; 1,2776 e 0,38%; 1,3277 e 0,42%; 1,3290 e 0,46%, respectivamente.

Observa-se que os coeficientes de variação (Quadro 22), menores que 1%, são considerados baixos evidenciando a criteriosa obtenção dos dados.

Quadro 22 - Resultados da análise de variância da Dimensão Fractal (D) referentes à curvas de nível, 440, 430, 420, 410, 400 e 390m para as bacias hidrográficas

Cota (m)	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
440	Bacia	4	0,08032334	0,08032334	778,29**
	Resíduo	50	0,00129006	0,00002580	
	Total	54	0,08161340		
		CV= 0,42%		Média= 1,2081	
430	Bacia	4	0,10057024	0,02514256	856,26**
	Resíduo	50	0,00146816	0,00002936	
	Total	54	0,10203840		
		CV= 0,46%		Média= 1,1875	
420	Bacia	4	0,06503180	0,01625795	495,70**
	Resíduo	50	0,00163989	0,00003280	
	Total	54	0,06667170		
		CV= 0,45%		Média= 1,2683	
410	Bacia	4	0,06702787	0,01675697	715,61**
	Resíduo	50	0,00117082	0,00002342	
	Total	54	0,06819869		
		CV=0,38%		Média= 1,2776	
400	Bacia	4	0,05001055	0,01250264	409,59**
	Resíduo	50	0,00152625	0,00003052	
	Total	54	0,05153679		
		CV= 0,42%		Média= 1,3277	
390	Bacia	4	0,10436873	0,02609218	696,23**
	Resíduo	50	0,00187382	0,00003748	
	Total	54	0,10624255		
		CV= 0,46%		Média= 1,3290	

** Significativo a 1% de probabilidade.

A comparação das médias da Dimensão Fractal (D) das cotas comuns às bacias hidrográficas está no Quadro 23. Os valores médios para a cota de 440m variaram de 1,1362 (bacia 2) a 1,2460 (bacia 4). Os maiores valores obtidos para as bacias são devidos às distribuições espaciais das curvas de nível. O teste de Tukey mostrou que as bacias 1 e 3 são iguais e diferem, estatisticamente a 5% de probabilidade, das bacias 2, 4 e 5, as quais diferem

entre si. A Dimensão Fractal (D) da cota de 440m das bacias 1 e 3 são iguais, provavelmente devido apresentarem similaridade Fractal com relação às suas formas.

Para a cota de 430m, de acordo com o teste de Tukey, a Dimensão Fractal (D) das bacias 1 e 3 são iguais e diferem estatisticamente a 5% de probabilidade das bacias 2, 4 e 5, as quais são iguais. O maior valor médio da Dimensão Fractal (D) da cota de 430m, 1,2566, foi obtido para a bacia 4 , e o menor, 1,1477, para a bacia 3 (Quadro 23).

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) da cota de 420m variaram de 1,2187 (bacia 2) a 1,3097 (bacia 4). Verifica-se no Quadro 23 que os valores médios das bacias 1 e 4 são iguais devido apresentarem similaridade fractal com relação às suas formas; e diferem das demais bacias, as quais diferem entre si, estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) da cota de 410m variaram de 1,2342 (bacia 3) a 1,3186 (bacia 1). De acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade aplicado aos valores médios, as bacias 1 e 4 são iguais devido apresentarem similaridade fractal com relação às suas formas; e diferem das bacias 2, 3 e 5, as quais diferem entre si, devido a não similaridade de Dimensão Fractal (D).

Para a cota de 400m os valores médios da Dimensão Fractal (D) variaram de 1,2805 (bacia 3) a 1,3577 (bacia 1) sendo que, as bacias 1 e 2 são iguais e diferem das bacias 3, 4 e 5 , as quais diferem entre si , estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para a cota de 390m os valores médios da Dimensão Fractal (D) variaram de 1,2552 (bacia 3) a 1,3757 (bacia 4). De acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade aplicado aos valores médios, as bacias 2 e 4 são iguais e diferem das bacias 1, 3 e 5 , as quais diferem entre si, Quadro 23.

Ficou evidenciado que a Dimensão Fractal (D) das curvas de nível variou entre 1,1362 a 1,3757, concordando com Harrison (1992), no sentido de que a Dimensão Fractal (D) no sistema de “Superfície”, pode variar entre 1 e 2 ($1<D<2$), evidenciando a fractalidade das bacias em relação ao relevo através das curvas de nível.

Quadro 23 - Valores médios da Dimensão Fractal (D) referentes às curvas de nível, 440, 430, 420, 410, 400, e 390m para as bacias hidrográficas

Cota	Dimensão Fractal (D)					DMS*
(m)	**BH 1**	**BH 2**	**BH 3**	**BH 4**	**BH 5**	
440	1,2148 **c**	1,1362 **d**	1,2098 **c**	1,2460 **a**	1,2336 **b**	0,0061
430	1,1459 **d**	1,1717 **c**	1,1477 **d**	1,2566 **a**	1,2157 **b**	0,0065
420	1,3036 **a**	1,2187 **d**	1,2467 **c**	1,3097 **a**	1,2626 **b**	0,0069
410	1,3186 **a**	1,2432 **c**	1,2343 **d**	1,3144 **a**	1,2774 **b**	0,0058
400	1,3577 **a**	1,3567 **a**	1,2805 **d**	1,3377 **b**	1,3059 **c**	0,0067
390	1,3263 **b**	1,3704 **a**	1,2552 **d**	1,3757 **a**	1,3175 **c**	0,0074

* Diferença mínima significativa.
Médias seguidas de letras diferentes, na linha, diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

6.5 Síntese da Discussão dos Resultados

As bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação estudadas, e pertencentes ao sistema hidrográfico da Bacia do Rio Santo Anastácio nos municípios de Marabá Paulista (bacia 1), Presidente Bernardes (bacias 2 e 3) e Santo Anastácio (bacias 4 e 5), possuem homogeneidade edafológica. Essas bacias têm as seguintes características comuns: pertencem a província geomorfológica, Planalto Ocidental Paulista; o clima é do tipo Aw; remanescentes da vegetação natural são característicos de floresta tropical; os solos são ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrúpticos A moderado textura arenosa / média relevo ondulado (ALFISOLS); o material de origem dos solos são produtos de alteração de arenitos do Grupo Bauru – Formação Adamantina do Cretáceo Superior (Carvalho et al.,1997; 2002) e o uso do solo é com pastagem há mais de vinte anos (Azevedo, 1999).

A classe dos Argissolos ocupa cerca de 29% da área do Estado de São Paulo e 51% da área da Bacia do Rio Santo Anastácio. Os Argissolos são na sua maioria, solos muito profundos (> 200cm); não apresentam, naturalmente, qualquer impedimento físico à penetração do sistema radicular pelo menos até 200cm de profundidade. Além disso, por apresentarem textura arenosa no horizonte A são facilmente preparados para o plantio. Esses solos são susceptíveis à erosão por apresentarem gradiente textural entre o horizonte A ou E

e o horizonte B, uma vez que o horizonte subsuperficial de menor permeabilidade, favorece o escoamento superficial das águas pluviais e, conseqüentemente a erosão; mas quando além do gradiente textural a mudança textural entre o horizonte A ou E e o B é abrupta e ocorrem em relevo ondulado e forte ondulado são muito mais susceptíveis à erosão. (Carvalho et al., 1997; 2002).

As bacias selecionadas têm semelhança geométrica, isto é, embora sejam de tamanho diferente, todas as medições guardam razões de escala aproximadamente constantes. A perda de semelhança geométrica entre as bacias, obtida pela aplicação do método de análise dimensional e teste de semelhança geométrica de Strahler (1957), variou de 0,02 a 0,30, considerados valores baixos segundo França (1968). Assim as variações quantitativas dos parâmetros estudados são devidas as bacias serem similares e não iguais.

A maioria dos trabalhos de fotointerpretação de solos verificou a discriminação de diferentes classes de solo através de vários parâmetros, principalmente da rede de drenagem e do relevo por refletirem a relação entre a infiltração e o deflúvio.

Recentemente alguns trabalhos têm sido desenvolvidos para verificar a Dimensão Fractal (D) de bacias hidrográficas (Nikora, 1991; Gomes, 1997), as quais não podem ser comparadas com este trabalho, porque as bacias foram obtidas de mapas topográficos normalmente de escalas pequenas, de modo que, não consideraram as cabeceiras de erosão que são rios de 1^{a} ordem de ramificação, não têm homogeneidade edafológica e nem padronização da ordem de ramificação da bacia. O Quadro 24 mostra os valores de todos os parâmetros estudados, convencionais e a Dimensão Fractal (D).

Quadro 24 - Síntese das características convencionais e Dimensão Fractal (D) da bacia, rede de drenagem e do relevo para as bacias hidrográficas representativas do Argissolo

Parâmetro	Bacia Hidrográfica					Média	Desvio padrão	Coef.var. (CV%)
	1	**2**	**3**	**4**	**5**			
				Parâmetros da Bacia				
C (km)	2,8800	2,0000	2,0600	2,3400	2,1400	2,2840	0,3570	15,6324
L (km)	1,9800	1,8600	1,6200	1,5000	1,6000	1,7120	0,1998	11,6706
Cp (km)	2,4400	1,9200	2,1200	1,6600	2,0000	2,0280	0,2855	14,0788
Cr (km)	5,8400	6,1600	5,8000	5,5600	6,6400	6,0000	0,4167	6,9442
P (km)	7,6000	6,3600	6,2400	6,4000	6,1600	6,5520	0,5936	9,0593
A (km^2)	2,7900	2,4800	2,2400	2,2200	2,1700	2,3800	0,2586	10,8636
D* (P)	1,2819	1,2816	1,2840	1,2648	1,3021	1,2829	0,0132	1,0313
D* (A)	1,8747	1,9052	1,9239	1,8564	1,9027	1,8926	0,0268	1,4156
				Parâmetros da Composição da Rede de Drenagem				
Nw_1	10,0000	12,0000	11,0000	9,0000	11,0000	10,6000	1,1402	10,7564
Nw_2	3,0000	3,0000	3,0000	2,0000	2,0000	2,6000	0,5477	21,0663
Nw_3	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-	-
Nt	14,0000	16,0000	15,0000	12,0000	14,0000	14,2000	1,4832	10,4454
Rb	3,1667	3,5000	3,3334	3,2500	3,7500	3,4000	0,2312	6,8008
Lw_1 (km)	3,7600	3,7600	2,8000	2,7600	3,8000	3,3760	0,5445	16,1286
Lw_2 (km)	1,4800	1,8000	1,3600	1,5600	1,9200	1,6240	0,2308	14,2133
Lw_3 Km)	0,6000	0,6000	1,6400	1,2400	0,9200	1,0000	0,4454	44,5421
Lt (km)	5,8400	6,1600	5,8000	5,5600	6,6400	6,0000	0,4167	6,9442
Rlw	2,5036	2,5445	1,4441	1,5137	2,0331	2,0078	0,5235	26,0756
Lmw_1(km)	0,3760	0,3133	0,2545	0,3067	0,3455	0,3192	0,0455	14,2665
Lmw_2(km)	0,4933	0,6000	0,4533	0,7800	0,9600	0,6573	0,2112	32,1355
Lmw_3(km)	0,6000	0,6000	1,6400	1,2400	0,9200	1,0000	0,4454	44,5421
Lmt (km)	1,4393	1,5133	2,3478	2,3267	2,2255	1,9765	0,4456	22,5457
Rl	1,2642	1,4576	2,6995	2,0665	1,8685	1,8713	0,5621	30,0376
D* (C)	1,3087	1,4038	1,3269	1,2934	1,3657	1,3397	0,0449	3,3503
				Parâmetros do Padrão de Drenagem				
Dd**	2,0932	2,4839	2,5893	2,5045	3,0599	2,5462	0,3452	13,5566
Fr***	3,5842	4,8387	4,9107	4,0541	5,0691	4,4914	0,6412	14,2757
T****	1,3158	1,8868	1,7628	1,4063	1,7857	1,6315	0,2533	15,5238
Tm****						1,6215		
Cl.tex.top.						Grosseira		

Quadro 24 - Continuação

Parâmetro	Bacia Hidrográfica					Média	Desvio padrão	Coef.var. (CV%)
	1	**2**	**3**	**4**	**5**			
	Parâmetros do Relevo							
AM (m)	461,0000	446,0000	446,0000	463,0000	451,0000	453,4000	8,1425	1,7959
Am (m)	357,0000	358,0000	350,0000	387,0000	387,0000	367,8000	17,7961	4,8385
Hm (m)	409,0000	402,0000	398,0000	424,0000	419,0000	410,4000	11,0136	2,6836
H (m)	104,0000	88,0000	96,0000	78,0000	64,0000	86,0000	15,6205	18,1634
Rr	0,0361	0,0440	0,0466	0,0333	0,0299	0,0380	0,0071	18,6768
D*cot.440	1,2148	1,1362	1,2098	1,2460	1,2336	1,2081	0,0426	3,5279
D*cot.430	1,1459	1,1717	1,1477	1,2566	1,2157	1,1875	0,0478	4,0241
D*cot.420	1,3036	1,2187	1,2467	1,3097	1,2626	1,2683	0,0385	3,0332
D*cot.410	1,3186	1,2432	1,2343	1,3144	1,2774	1,2776	0,0390	3,0550
D*cot.400	1,3577	1,3567	1,2805	1,3377	1,3059	1,3277	0,0337	2,5386
D*cot.390	1,3263	1,3704	1,2552	1,3757	1,3275	1,3290	0,0487	3,6632

*Dimensão Fractal; **km de rios/km^2; ***nº. de rios/km^2; ****nº. de rios/km.

Para a obtenção da Dimensão Fractal (D) de parâmetros das bacias hidrográficas utilizou-se o método SPA – BOX, Spadotto & Seraphim (1998). Este método utiliza uma malha de tamanho conhecido (2mm $_x$ 2mm), sob a qual é fixada a figura (gráfico ou imagem) a ser analisada. Para definir o padrão fractal das bacias e poder comparar a Dimensão Fractal (D), com os parâmetros convencionais que caracterizam a relação infiltração/deflúvio do solo, foi obtida a dimensão fractal para: o contorno do divisor d'água , que representa o Perímetro; para a superfície circunscrita pelo divisor d'água , que representa a Área; e para a rede de drenagem que representa a Composição da Rede de Drenagem.

Para sintetizar a discussão dos resultados e mostrar os valores de todos os parâmetros estudados, convencionais e a Dimensão Fractal (D) foi elaborado o Quadro 24.

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) para cada bacia e o valor médio para o Argissolo, para os três parâmetros analisados, variou de 1,2648 a 1,9239, mostrando que as bacias apresentam fractalidade concordando com Harrison (1992) que considera que a Dimensão Fractal (D) para o "Sistema de Superfície", utilizado nesta pesquisa, pode variar entre 1 e 2 (1<D<2).

Observa-se que o coeficiente de variação das médias de cinco dados referentes aos parâmetros convencionais da Bacia, maior comprimento (C), maior largura (L),

comprimento do rio principal (Cp), comprimento total da rede (Cr), perímetro (P) e área (A) variaram de 6,9442 % para o Cr a 15,6324 % para o C; enquanto que o coeficiente de variação da Dimensão Fractal (D) do Perímetro e da Área foram de: 1,0313% e 1,4156%, respectivamente, mostrando que o processo de obtenção da Dimensão Fractal (D) é mais preciso para caracterizar a bacia , em relação aos parâmetros convencionais da bacia, além de ser resultado de uma análise com menores distorções da realidade, concordando com (Mandelbrot, 1982).

A composição da rede de drenagem da bacia hidrográfica de 3ª ordem de ramificação, segundo Horton (1945), Maxwell (1955), Strahler (1957), França (1968) e Vasques Filho (1972) é caracterizada através de quinze parâmetros (Quadro 24) que são relacionados com o número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios da bacia.

A Dimensão Fractal (D) obtida com a contagem das caixas sobre o traçado dos rios circunscritos pelo divisor d'água foi denominada de Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem por representar o número, comprimento total e comprimento médio (relação entre o comprimento total e o número de segmentos de rios), e conseqüentemente as razões de ramificação, de comprimento total e de comprimento médio.

O coeficiente de variação dos dados em relação às médias dos parâmetros convencionais variaram de 6,8008%, para a razão de ramificação, a 44,2133%, para o comprimento total e médio de segmentos de rios de 3ª ordem de ramificação, enquanto que, o coeficiente de variação da Dimensão Fractal (D) é de 3,3503%, indicando que a caracterização da composição da rede de drenagem através da Dimensão Fractal (D) apresenta-se mais consistente.

A Dimensão Fractal (D) da Área pode ser relacionada, também, com os índices densidade de drenagem (Dd) e freqüência de rios (Fr) e, a Dimensão Fractal (D) do Perímetro com o índice razão de textura (T) e ambas com a razão de textura média (Tm – média ponderada da razão de textura em relação às áreas das bacias) e, portanto, relacionam-se com o padrão da rede de drenagem devido ao fato de que na área considerada, circunscrita pelo divisor d'águas, encontra-se a rede de drenagem. Assim, para os valores de densidade de drenagem, 2,5462, freqüência de rios, 4,4914, razão de textura, 1,6315, razão de textura

média,1,6215 e classe de textura topográfica grosseira, corresponde as Dimensões Fractais (D) 1,8926 (Área) e 1,2829 (Perímetro) caracterizadas pelo padrão fractal.

A análise de variância global (Quadro 18) que considerou a Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área (tratamento A) e as bacias hidrográficas (tratamento B) foi significativa, indicando que a Dimensão Fractal (D) da Composição da rede de drenagem, Perímetro e Área diferem entre si e para as bacias hidrográficas a 1% de probabilidade. A comparação das médias da Dimensão Fractal (D) referentes às bacias para a Composição da Rede de Drenagem (1,3397), Perímetro (1,2829)e Área (1,8926) mostrou que essas Dimensões Fractais (D) diferem entre si a 5% de probabilidade (Quadro19), indicando que esses parâmetros são importantes para definir a fractalidade das bacias hidrográficas de 3^{a} ordem de ramificação representativas do Argissolo. A comparação das médias da Dimensão Fractal (D) referentes à Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área para as bacias hidrográficas (1,4884-bacia 1; 1,5302-bacia 2; 1,5116-bacia 3; 1,4715-bacia 4 e 1,5235-bacia 5), mostrou que a Dimensão Fractal (D) dos três parâmetros, em conjunto, diferem para as bacias a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (Quadro 20), indicando que essas Dimensões Fractais (D), foram sensíveis para refletir a perda de similaridade geométrica das bacias que variou de 0,02 a 0,30 (Quadro 3) e que na natureza os padrões são similares e não iguais.

O ajuste de equações de regressões simples monologarítmica (Log (Y) = A + BX) para os valores referentes à composição da rede de drenagem, assumindo “Y” os valores de número (Nw), comprimento total (Lw) e comprimento médio (Lmw) de segmentos de rios e “X” as ordens de ramificação foram significativas, indicando que a rede de drenagem segue as Leis hidrofísicas de Horton e Strahler e conseqüentemente, o seu desenvolvimento se faz em equilíbrio, resultante da adequação do uso do solo com os elementos do ambiente, e que a rede de drenagem não é controlada pela rocha subjacente.

O uso do solo com pastagem formada com gramíneas, que ocupam totalmente o terreno, com uma densa vegetação, há mais de vinte anos induziu a agregação dando estabilidade à estrutura do solo e conseqüentemente reduziu e controla a erosão tornando o solo menos suscetível à erosão.

O padrão fractal característico da Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem em média de 1,3397, provavelmente, também demonstra que a rede de drenagem segue as Leis hidrofísicas de Horton (1945) para número e comprimento médio e de Strahler (1957) para comprimento total, indicando segundo esses autores, que o desenvolvimento da rede de drenagem se faz em equilíbrio com os elementos do ambiente.

Os valores da Dimensão Fractal do Perímetro, da Área e da Composição da Rede de Drenagem obtidos: 1.2819; 1,8747 e 1.3087 – bacia 1; 1.2816; 1.9052 e 1.4038 – bacia 2; 1,2840; 1,9239 e 1,3269 – bacia 3; 1,2648; 1,8564 e 1,2934 – bacia 4 e 1,3021; 1,9027 e 1,3657 – bacia 5, respectivamente, reflete a fractalidade das bacias, provavelmente correspondendo aos 24 parâmetros convencionais analisados; e os valores médios da Dimensão Fractal (D) do Perímetro, 1,2829, da Área, 1,8926 e da Composição da Rede de Drenagem, 1,3397, provavelmente caracterizam a estrutura das bacias hidrográficas de 3ª ordem de ramificação, sob as condições ambientais descritas no Quadro 1 e do material utilizado para obter a rede de drenagem e as bacias.

Não foi observada variação muito contrastante dos parâmetros: maior e menor altitude, altitude média e amplitude altimétrica, provavelmente devido a área estudada estar localizada no Planalto Ocidental Paulista e assentada sobre arenitos de formação plano-paralela. Conseqüentemente, o relevo regional do solo da área estudada é ondulado com topografia pouco movimentada, constituída, por elevações de altitudes relativas de 64 a 104m, com declives moderados, predominantemente variáveis de 8 a 20% (Quadros 1 e 24).

Uma das formas de representar o relevo é através do processo de curvas de nível que são linhas fechadas, que ligam pontos de igual altitude. Assim, através da distância horizontal entre as curvas de nível pode-se verificar o declive e a forma das vertentes, as quais agem sobre a dinâmica d'água, ou seja, na infiltração e deflúvio das águas pluviais.

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) obtidos para as curvas de nível comuns às bacias hidrográficas, cotas de 440, 430, 420, 410, 400 e 390 metros, foram os

seguintes: 1,2081; 1,1875; 1,2683; 1,2776; 1,3277 e 1,3290, respectivamente. Esses valores evidenciam a fractalidade das bacias em relação ao relevo, pois a Dimensão Fractal (D), variou entre 1 e 2 (1<D>2), estando de acordo com o Sistema de “Superfície” utilizado (Spadotto, 1998). O coeficiente de variação dos cinco dados em relação à média para a Dimensão Fractal (D) das curvas de nível são baixos e variaram de 2,5386 a 4,0241%, enquanto que para a amplitude altimétrica e a razão de relevo são médios iguais a 18,1634 e 18,6768%, respectivamente, e para os demais parâmetros convencionais também é considerado baixo.

Os valores médios de Dimensão Fractal (D) das curvas de nível das bacias em relação ao relevo, para as cotas 440, 430, 420, 410, 400 e 390 foram os seguintes: 1,2081; 1,1875; 1,2683; 1,2776; 1,3277 e 1,3290, respectivamente. Esses valores refletem a distribuição espacial fractal curvas de nível, sob as condições do material cartográfico utilizado.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa, nas condições existentes e com a metodologia utilizada permitiram as seguintes conclusões:

A Dimensão Fractal (D) obtida com a análise do traçado dos rios circunscritos pelo divisor d'água da bacia reflete a Composição da Rede de Drenagem representando os parâmetros convencionais: número, comprimentos total e comprimento médio de segmentos de rios e as razões de ramificação, comprimento total e comprimento médio;

A Dimensão Fractal (D) obtida com a análise dentro da área circunscrita pelo divisor d'água da bacia caracteriza a Dimensão Fractal (D) da Área e do Perímetro e reflete os parâmetros convencionais da Bacia: maior comprimento, maior largura, comprimento do rio principal, comprimento total da rede, perímetro e área; e também, os parâmetros convencionais do Padrão da Rede de Drenagem: densidade de drenagem, freqüência de rios, razão de textura, razão de textura média e classe de textura topográfica;

As bacias hidrográficas estudadas são estruturas com Dimensão Fractal (D) do Perímetro, 1,2829; da Área, 1,8926 e da Composição da Rede de Drenagem, 1.3397, sob as condições ambientais existentes e do material utilizado para obter a rede de drenagem e as bacias;

O ajuste das equações de regressão simples monologarítmicas, $\log y = a + bx$, para número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios, indica

que a rede de drenagem das bacias obedece as Leis hidrofísicas de Horton e Strahler e que seu desenvolvimento se faz em equilíbrio com o ambiente;

A Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem das bacias, com valor médio de 1,3397 indica que a rede de drenagem segue as Leis hidrofísicas;

Os valores médios totais da Dimensão Fractal (D) do Perímetro, da Área e da Composição da Rede de Drenagem iguais a 1,4884; 1,5302; 1,5116; 1,4715 e 1,15235 diferem para as bacias indicando que foram sensíveis para refletir a perda de similaridade geométrica das bacias que variou de 0,02 a 0,30 e que, na natureza os padrões são similares e não iguais;

Os valores médios da Dimensão Fractal (D) do Perímetro, 1,2829; da Área, 1,8926 e da Composição da Rede de Drenagem, 1,3397, das bacias hidrográficas, diferem entre si, indicando que esses parâmetros são importantes para definir a fractalidade das bacias de 3ª ordem de ramificação, e devem ser analisados em conjunto;

Os valores médios de Dimensão Fractal (D) das curvas de nível das bacias, 1,2081; 1,1875; 1,2683; 1,2776; 1,3277 e 1,3290, para as cotas 440, 430, 420, 410, 400 e 390m, respectivamente, refletem a distribuição espacial fractal das curvas de nível, sob as condições do material cartográfico utilizado;

Os menores coeficientes de variação obtidos para a Dimensão Fractal (D) do Perímetro, da Área e da Composição da Rede de Drenagem mostram que o processo de obtenção da Dimensão Fractal (D) é mais preciso para caracterizar a bacia e a rede de drenagem em relação aos parâmetros convencionais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS [1]

AZEVEDO, R.B. de. *Interpretação fotográfica da rede de drenagem e do relevo para a discriminação e a avaliação da erosão de solos em três municípios do Oeste do Estado de São Paulo*. Botucatu, 1999. 99p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

AZEVEDO, R.B. de., SPADOTTO, A.J., GARCIA, L.H., BARBERIS, P.L., REZENDE, M.A.de. *Watershed drainage analysis by fractal dimension.* In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIROMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5 , 2000, Belo Horizonte. *Anais*... Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. p.137.

AYRES, Q. C. *Soil erosion and the its control.* New York: McGraw-Hill, 1936. 365p.

BERTON, C. C., LA POINTE, P.R. *Fractals in the earth sciences*. New York: Plennum Press, 1995. 265p.

BERTONI, J., LOMBARDI, F.N. *Conservação do solo*.Piracicaba: Livroceres, 1985. 392p.

[1] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Faculdade de Ciências Agronômicas. *Normas para elaboração de dissertações e teses.* Botucatu, 1997. 35p.

BERTONI, J., PASTANA, F.I., LOMBARDI NETO, F., BENATTI JUNIOR, R. *Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo no Instituto Agronômico*. Campinas, Instituto Agronômico, 1972. 56p. (Circular 20).

BORGES, F. I. M. *Análise de elementos da paisagem no planejamento*. Presidente Prudente, 1997. 141p. Dissertação (Mestrado em Geografia/Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro, 1960. 605p.

CAMARGO, M. N., KLANT, E., KAUFFMAN, J.H. *Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil.* Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1987. 24p.

CARVALHO, W. A. *Fotointerpretação de bacias hidrográficas de amostras circulares de redes de drenagem de solos com horizonte B textural*. Piracicaba, 1977. 126p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz “, Universidade de São Paulo.

CARVALHO, W. A., ESPÍNDOLA, C. R., PIEDADE, G. C. R. *Inter-relação solo, relevo e rede de drenagem em três áreas fisiográficas distintas.* In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 8 , 1978, Botucatu. *Anais*... Botucatu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1978. p.428-42.

CARVALHO, W. A. *Relações entre relevo e solos da bacia do Rio Capivara Município de Botucatu – SP*. Botucatu, 1981. 181p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

CARVALHO, W. A., FRANÇA, G. V. de., CURI, P. R. Aplicação de análise multivariada na discriminação de unidades de solo, mediante parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas, em Botucatu, SP. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v.14, n.2, p.195-203, 1990.

CARVALHO, W. A., PEREIRA. M. A., PFEIFER, R.M. Fotointerpretação de bacias hidrográficas na discriminação de solos do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo *de* Pinciguaba, SP. *Científica*, v.20, n.1, p.27-42, 1992.

CARVALHO, W. A. *Discriminação de solos da Bacia do Rio Santo Anastácio através de índices da rede de drenagem e do relevo*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24.,1995, Viçosa. *Resumos*...Viçosa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. p.445.

CARVALHO, W. A., ACHÁ, L. P., FREIRE, O., RENNÓ,C.D. Levantamento semidetalhado dos solos da Bacia do Rio Santo Anastácio. *Bol. Cient. Fac. Ciênc. Tecnol./UNESP*, Presidente Prudente, v.1/2, n.2, p.1-499, 1997. (2. ed. rev. atual., 2002) – (no prelo).

CARVALHO, W. A., FREIRE, O., MORAES, M. H. *Distribuição de solos e semelhança geométrica de bacias hidrográficas*. In: SEMANA DE GEOGRAFIA, 2, 2000, Presidente Prudente. *Caderno*... Presidente Prudente: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, 2000. p.137-8.

CARVALHO, W. A., FREIRE, O., MORAES, M. H. Relações entre parâmetros da rede de drenagem e do relevo de solos do Oeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. Anais...Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. p.239.

CHAVES, C. M. G. P. Fenômenos de agregação. *Cienc. Hoje*, v.10, p.27-32, 1989.

COELHO, A. G. S. de. Obtenção de dados quantitativos com o emprego de fotografias aéreas verticais. *Aerofotogeografia*, São Paulo, v.8, n.3, p.1-23, 1972.

D'AGOSTINI, L. R. *Erosão*: o problema mais que o processo. Florianópolis: Ed. da Universidade Federal de São Carlos, 1999. 131p.

DEMATTÊ, J. L. I. *Fatores de formação de solos*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1978. 33p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos.* Rio de Janeiro, 1999. 412p.

ESPINDOLA, C. R. *Relações entre os solos e elementos da paisagem na zona do baixo Rio do Peixe (Região Conchas-Anhembi, S.P.*). Piracicaba,1977. 113p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

ESTADOS UNIDOS. *Soil taxonomy:* a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, 1975. 754p. (Handbook, 436).

ESTADOS UNIDOS. Departament of Agriculture. Soil Survey Division Soil Conservation Sérvice. Soil Survey Staff. *Keys to soil taxonomy.* 6.ed. Washington, 1994. 306p.

FAUCK, R. *Contribution a l'étude des sols des regions tropicales*: les sols rouges sur sables et sur grés d'Afrique Occidentale. Paris: ORSTOM, 1972. 257p. (Memoires, n.61).

FRANÇA, G. V. de. *Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracic*aba. Piracicaba, 1968. 151p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

FREIRE, J. C. *Fotointerpretação de redes de drenagem de três solos da região de Alpinópolis, Minas Gera*is. Piracicaba, 1977. 136p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

GARCIA, G. J., PIEDADE, G. C. R. *Topografia aplicada às ciências agrárias.* São Paulo: Nobel, 1978. 256p.

GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 12.ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1987. 467p.

GOMES, M. H. R. *Análise fractal de redes de canais de bacias hidrográficas*. São Carlos, 1997. 82p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GUERRINI, I. A., SWARTZENDRUBER, D. Introducing the fractal theory to study the soil water movemente for agronomy students**.** *Am. Assoc. Phys. Teach. Announ*., Stony Brook, v.23, n.4, p.50, 1993.

GUERRINI, I. A., SWARTZENDRUBER, D. Fractal characteristics of the horizontal movement of water in soils**.** *Fractals*, River Edge, v.2, n.3, p.465-8, 1994.

GUZMAN, M., MARTIN, M. A., MORÁN, M., REYES, M. *Estucturas fractals y sus aplicaciones*. Barcelona: Labor, 1993. 279p.

HARRISON, A. *Fractals in chemistry*. Oxford: Science Publications, 1992. 90p.

HORTON, R. E. Erosinal development of streams and their drainage basins: hidrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am*. Colorado, v.56, p.275-370, 1945.

HOWE, R. H. L. The application of aerial photographic interpretation to the investigation of hidrologic problems. *Photogramm. Eng*., Washington, v.26, n.1, p.85-95, 1960.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, v.1, 1981a. 94p. Escala 1:1000.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, v.1, 1981b. 126p. Escala 1:500.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Carta do Brasil.*. São Paulo, 1974. Escala 1:50.000.

IWASA, O. Y., PRANDINI, F. L. *Diagnóstico da origem e evolução de boçorocas: condição fundamental para a prevenção e correção*. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DA EROSÃO, Curitiba, 1980. p.5-30.

LEMOS, R. C. de., SANTOS, R. D. dos. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 3.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83p.

LUEDER, D. A. *Aerial photographic interpretation: principles and applications*. New York: McGraw-Hill, 1959. 462p.

MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature.* New York: W.H. Freeman, 1977. 468p.

MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature*. New York: W. H. Freeman,1982. 468p.

MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature-updat ans augmented*. New York: W.H. Freeman, 1983. 568p.

MAXWELL, J. C. The bifurcation ratio in Horton´s law of stream numbers *Trans. Am.. Geophys. Union*, Washington, v.36, p.520, 1955.

MONTEIRO, C. A. F. *A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo*: estudo em forma de -atlas. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1973.

NIKORA, V. I. On self-similarity and self-affinity of drainage basins. *Water Resour. Res.*, v.27, p.1327-33, 1991.

PARVIS, M. Drainage pattern significance in airphoto identification of soil and bedrocks. *Photogramm. Eng*., Washington, v.16, p.387-409, 1950.

PEITGEN, O. H., SAUPE, D., BARNSLEY, M. F. *The science of fractal images*. New York: Springer-Verlag, 1988. 312p.

PENTEADO, M. M. *Geomorfologia do setor centro-ociedental da depressão periférica paulista*. Rio Claro,1968. 86p. Tese (Doutorado em Geografia) - (Faculdade de Filosofia Ciências e Letras).

PERFECT, E., KAY, B. D. Fractal theory appied to soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.55, p.1552-8, 1991.

PERFECT, E., RASIAH, H. , KAY, B. D. Fractal simensions of soil aggregate-size distribuitions calculated by number and mass. *Soil Sci. Soc. Am. J*., v.56, p.1407-09, 1992.

PIEDADE, G. C. R. *Evolução de voçorocas em bacias hidrográficas do município de Botucatu-SP*. Botucatu, 1980. 161p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

PUPO, N. I. H. *Manual de pastagens e forrageiras*. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 345p.

RANZANI, G. *Manual de levantamento de solos.* São Paulo: Universidade de São Paulo, 1965. 112p.

RAY, R. G. *Fotografias aéreas na interpretação e mapeamento geológico*. São Paulo: Instituto Geográfico e Geológico, 1963. 88p.

RICCI, M., PETRI, S. *Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica*. São Paulo: Nacional, 1965. 226p.

RIEU, M., SPOSITO, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II applications. *Soil Sci. Soc. Am*. J., v.55, p. 1239-44, 1991.

SAN'TANNA NETO, J. L., BARRIOS, N. A. Z. Variabilidade e tendências das chuvas na *região de Presidente Prudente*. *Rev. Geografia*, São Paulo, v.11, p.63-76, 1992.

SARQUIS, S. *Modificações antrópicas do solo: influênci*a *na dinâmica econômica e populacional do município de Martinópolis.* Presidente Prudente, 1996. 123p. Dissertação (Mestrado em Geografia/Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.

SMITH, K. G. Standards for grading texture of erosional topography. *Am. J. Sci*., New Haven, v.248, p.655-8, 1950.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambory, New Jersey. *Bull. Geol. Soc. Am*., Colorado, v.67, p.597-646, 1956.

SILVA, F. B. *Interpretação fotográfica da rede de drenagem para a discriminação de solos da bacia do Córrego da Onça no município de Presidente Prudente – SP*. Rio Claro,

2001. 98p. Dissertação (Conservação e Manejo de Recursos/Gestão Integrada de Recursos) - Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista.

SOUZA, M. L. P. de. *Fotointerpretação das redes de drenagem de três solos com horizonte B latossólico ocorrentes no Município de Ponta Grossa* - PR. Piracicaba, 1975. 135 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SPADOTTO, A. J., GUERRINI, I. A. Fractais: conceitos e paradigma através de estudos em materiais estruturados. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIENCIA, 48 ,1996, São Paulo. *Resumos...* São Paulo: Sociedade Brasileira Para o Progresso da Ciência, 1996. p.561.

SPADOTTO, A. J., GUERRINI, I. A., REZENDE, M. A. de. Método prático para a determinação da dimensão fractal aplicado nas áreas agronômica e zootécnica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1, 1996, São Carlos. *Anais...* São Paulo: Sociedade Brasileira Para o Progresso da Ciência, 1996. p.483 - 9.

SPADOTTO, A. J., GUERRINI, I. A., REZENDE, M. A. de. Desenvolvimento de um método didático para a determinação da dimensão fractal. In REUNIAO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA, 49, 1997, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Sociedade Brasileira Para o Progresso da Ciência, 1997. p.119.

SPADOTTO, A. J. SERAPHIM, O. J. Determinação da dimensão fractal pela fórmula Spadotto e pelo MC-D. *Energ. Agric*.(Botucatu), v.12, n.4, p.24-31, 1998.

SPADOTTO, A. J. *Processamento e estabilidade de rações através da dimensão fractal*. Botucatu, 1998. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM – *SAS*: user's guide. Cary: SAS Institute Inc. 1996. 956p.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bull. Geol. Soc. Am*., Colorado, v.63., p. 1117-42, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am.. Geophys. Union*, New Haven, v. 38., p.913-20, 1957.

TARBOTON, D. G., BRAS, R. L., RODRIGUES, I. I. The fractal nature of river networks. *Water Resour. Res*., v.24, n.8, p.1317-22, 1988.

TRICART, J. As relações entre a morfogênese e a pedogênese. *Not. Geomorfol*., v.8., p.5-18, 1968.

VASQUES FILHO, J. *Critérios morfométricos aplicados à fotointerpretação de redes de drenagem em três unidades de solos no Município de Piracicab*a. Piracicaba, 1972. 113p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

VICSEK, T. *Fractal growth fenomena*. 2.nd. Singapore: World Scientist Publishing. 1992. 488p.

VIEIRA, N. M. 1978. *Estudo geomorfológico das Voçorocas de Franca (SP)* Rio Claro, 1978. 225p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

VILAS BOAS, S. *Discriminação de solos mediante parâmetros da rede de drenagem de bacias hidrográficas e amostras circulares*. Rio Claro, 2001. 66p. Tese (Doutorado em Geociências/Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

VON ENGELN, O.D. *Geomorphology:* systematical and regional. New York: The Mc Millan, 1942. 655p.

YOUNG, I. M., CRAWFORD, J. W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *J. Soil Sci*., v.42, p.187-92, 1991.