

APLICAÇÃO DA ANÁLISE FRACTAL EM BACIA HIDROGRÁFICA: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA CARACTERIZAR O AMBIENTE

Roberto Bernardo de Azevedo – azevedo@prudente.unesp.br

Universidade Estadual Paulista “Campus de Presidente prudente”, Departamento de Física Química e Biologia.

Rua Roberto Simonsen, 305

19060-900 – Presidente Prudente – SP

Wolmar Aparecida Carvalho – tosin@laser.com.br

Universidade Estadual Paulista “Campus de Presidente prudente”, Departamento de Física Química e Biologia.

Rua Roberto Simonsen, 305

19060-900 – Presidente Prudente – SP

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 mostrar, principalmente, aos envolvidos no Curso de Engenharia Ambiental uma forma diferenciada de se observar o objeto fractal, uma Bacia hidrográfica de 3ª ordem de ramificação, através da análise fractal. Aplicou-se a dimensão fractal para a bacia hidrográfica 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. Determina-se a dimensão fractal 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 total e médio dos segmentos dos rios).*

Palavras-chaves: *Bacia hidrográfica, Análise fractal, Dimensão fractal, Engenharia Ambiental.*

1. INTRODUÇÃO

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 análise da rede de drenagem permite avaliar, através das leis hidrofísicas 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. 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. Em vista do exposto, objetivou-se neste trabalho aplicar a análise fractal em rede de drenagem de uma bacia hidrográfica de 3ª ordem de ramificação, obtida de fotografias aéreas.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Material

Serviu de base para o presente trabalho uma bacia de 3ª ordem de ramificação, pertencente ao sistema hidrográfico da bacia do Rio Santo Anastácio no município de Presidente Bernardes, Oeste do Estado de São Paulo, inserida entre as seguintes coordenadas geográficas: 22° 06' 22" a 22° 07' 48" de latitude S e 51° 32' 50" a 51° 33' 47" de longitude W Grw.

De acordo com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981a) a bacia, no oeste do Estado de São Paulo, encontra-se localizada na província geomorfológica denominada Planalto Ocidental Paulista e esta assentada, predominantemente, sobre arenitos do Grupo Bauru – Formação Adamantina do Cretáceo Superior e nas baixadas planas e geralmente úmidas, ocorrem deposições do Cenozóico (IPT, 1981b).

Os solos da bacia, segundo CARVALHO et al. (1997, 2004) são predominantemente ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abruptos A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado e o clima do município de Presidente Bernardes, segundo a classificação climática de Köppen é do tipo Aw, tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, porém perturbado pela circulação atmosférica regional. A temperatura e a precipitação média anual são: 22,1°C e 1233mm, respectivamente, com excedente hídrico anual de 147mm de dezembro a março e deficiência hídrica anual de 17mm de junho a setembro, concentrando-se 73% das precipitações nos meses de outubro a março.

Segundo CARVALHO et al. (1997, 2004) remanescentes da vegetação natural, floresta tropical subcaducifólia correlacionado com os regimes de temperatura e umidade do solo, provavelmente indica regime de temperatura isohipertérmico (temperatura média anual do solo, a 50cm de profundidade igual ou superior a 22°C e com diferença entre a média de temperatura do solo no verão e no inverno inferior a 5°C) e regime de umidade ústico (o solo fica mais de 90 dias cumulativos, por ano, sem água disponível às plantas até 50cm de profundidade). O relevo é ondulado com topografia pouco movimentada, apresentando declives moderados, variáveis de 8 a 20%.

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.

Para a localização da bacia hidrográfica estudada foi utilizada a folha da Carta do Brasil de Presidente Bernardes (SF-22-Y-B-II-20), proveniente de restituição aerofotogramétrica na escala 1:50.000 com curvas de nível de 20 em 20 metros, editadas em 1974, pelo IBGE.

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. , (1997,2004), na escala 1:50.000.

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 planímetro Polar, marca OTT (áreas).

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.

2.2 Métodos

A seleção da área de estudo teve por base o mapa semidetalhado dos solos da Bacia do Ribeirão Santo Anastácio, CARVALHO et al., (1997, 2004), sendo escolhida uma área pertencente ao município de Presidente Bernardes.

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

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.

Na rede de drenagem foi delimitada, com o uso do estereoscópio, uma bacia de 3ª ordem de ramificação, segundo o sistema de HORTON (1945) modificado por STRAHLER (1957), por ser eficiente no estudo de solos, FRANÇA (1968); CARVALHO (1977, 1981); CARVALHO et al.,(1990). AZEVEDO (1999); SILVA (2001) e VILAS BOAS (2001).

A bacia de 3ª ordem de ramificação foi identificada e transferida para a carta planialtimétrica com a escala transformada de 1:50.000 para 1:20.000, conforme o exposto no item anterior.

A análise convencional constou de: a) composição da rede de drenagem: número de segmentos de rios (N) em cada ordem de ramificação (w) - **N_w** e o total da bacia - **N_t**; comprimento total de segmentos de rios - **L_w** e o total da bacia - **L_t**; e comprimento médio de segmentos de rios - **L_{mw}** e o total da bacia - **L_{mt}** (HORTON, 1945); b) parâmetros dimensionais: perímetro - **P** e área - **A** da bacia hidrográfica.

A dimensão fractal foi determinada através do método SPA – BOX, SPADOTTO e 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 ($M = i \times I$); 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 a bacia hidrográfica 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, AZEVEDO et al (2000).

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: 1, 2 e 3.

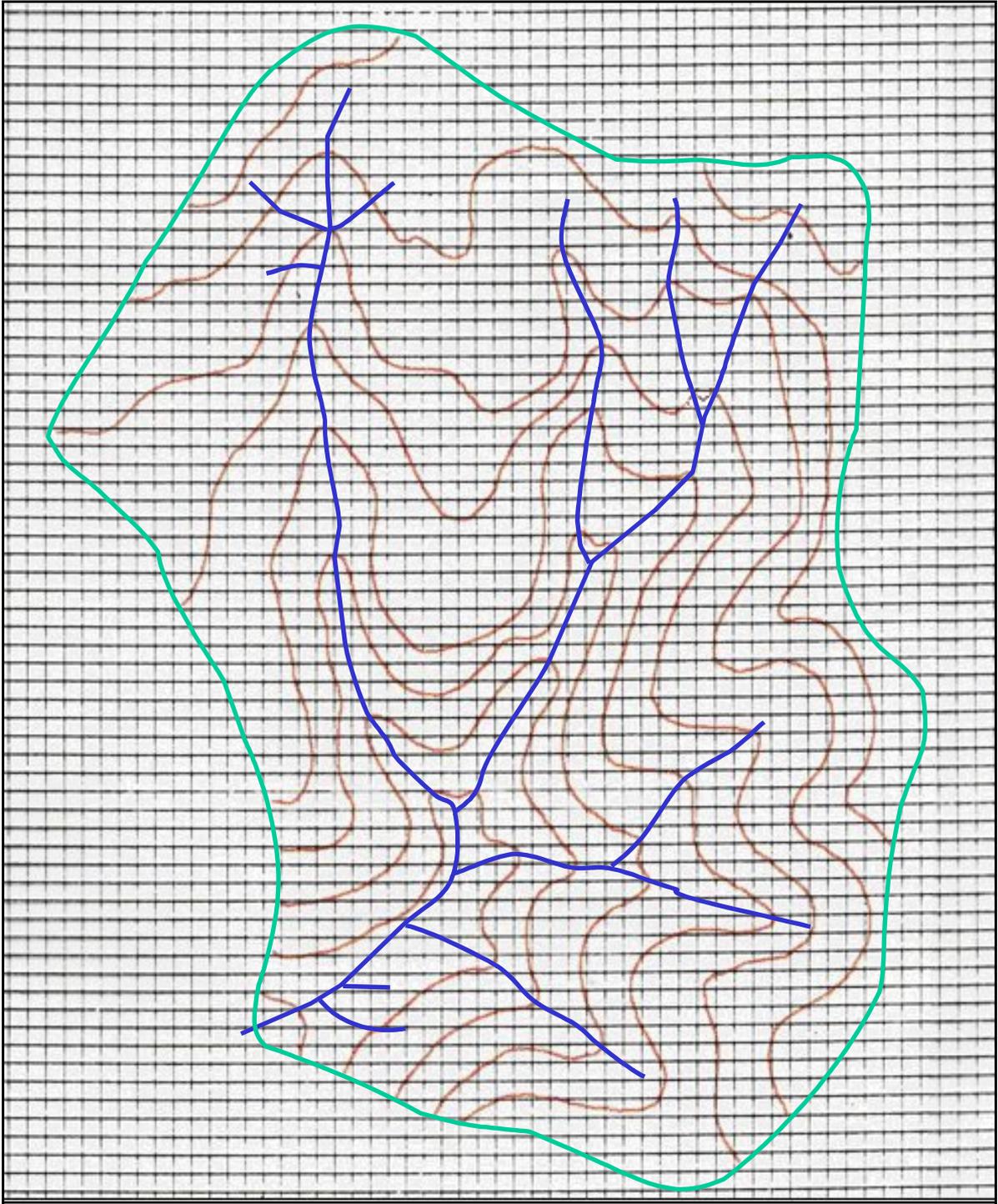


Figura 1 – Representação da bacia hidrográfica, com o recobrimento da malha usada para a determinação da dimensão fractal.

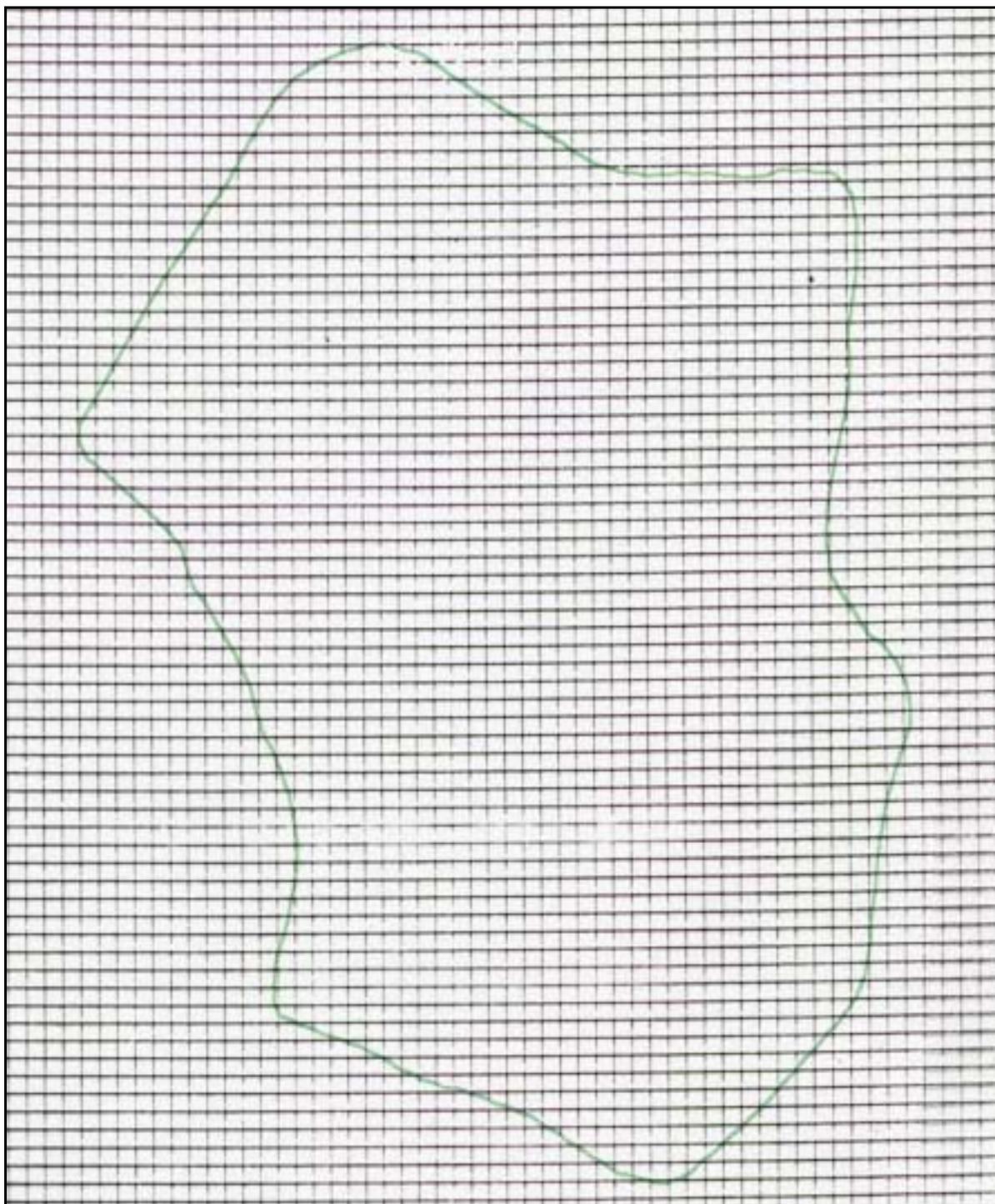


Figura 2 – Representação do contorno da bacia hidrográfica (divisor d'água) coberto com a malha, para a determinação das dimensões fractais do perímetro e da área da bacia.

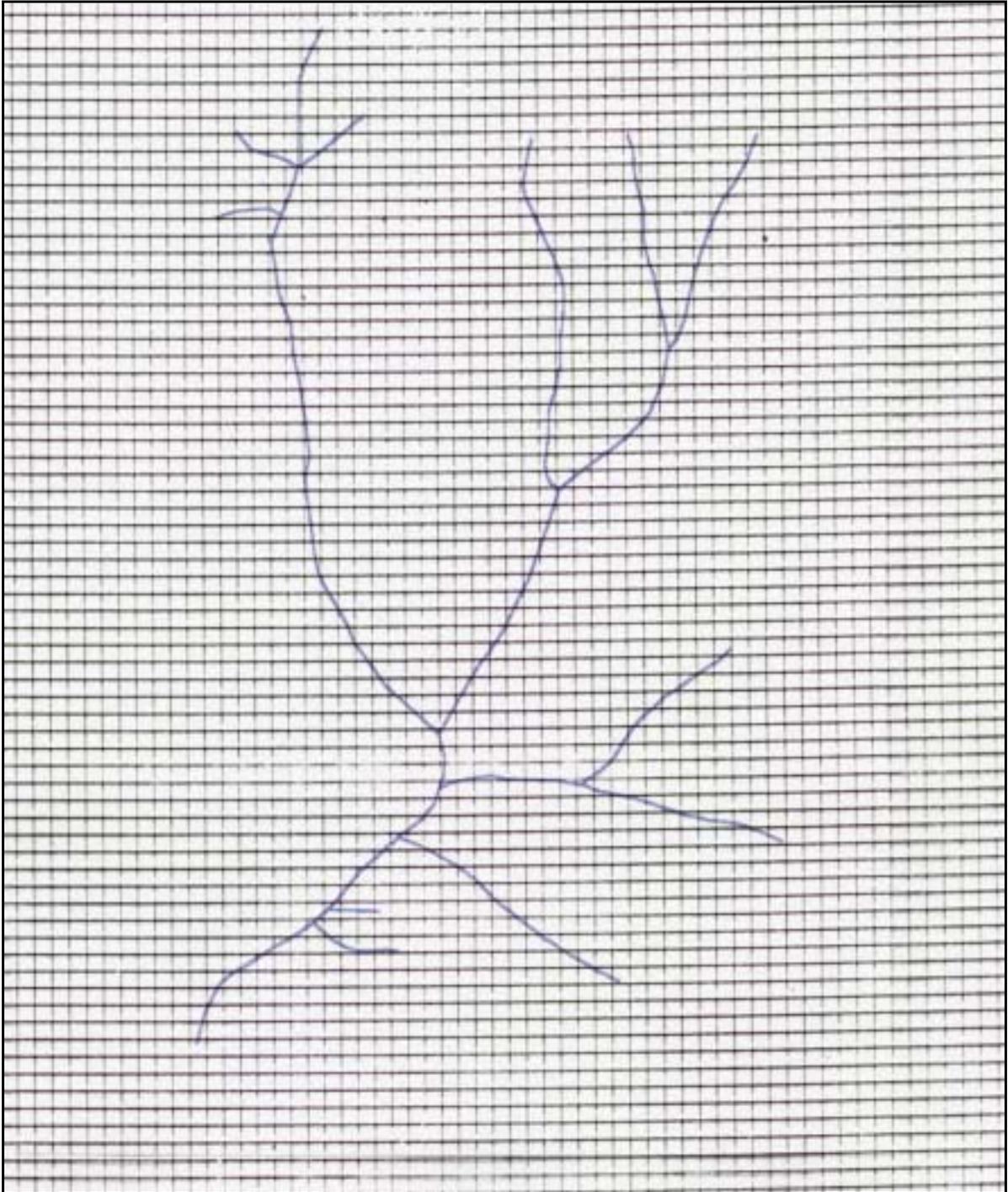


Figura 3 – Representação da rede de drenagem coberta com a malha, para a determinação da dimensão fractal da composição da rede de drenagem.

3. RESULTADOS

3.1 Análise Convencional

Os resultados da composição da rede de drenagem, perímetro e área da bacia hidrográfica, localizada em clima do tipo Aw, contendo ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrupticos A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifolia relevo ondulado, que têm regime de temperatura isohipertérmico e regime de umidade ústico e estão sob cobertura vegetal de gramíneas, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros convencionais da composição da rede de drenagem: número (Nw) comprimento total (Lw) e comprimento médio (Lmw) de segmentos de rios; perímetro (P) e área (A) da bacia hidrográfica estudada.

Ordem	Nw	Nt	Lw	Lt	Lmw	Lmt	P	A
w			(km)		(km)		(km)	(km ²)
1	12,0000		3,7600		0,3133		6,3600	2,4800
2	3,0000		1,8000		0,6000			
3	1,0000	16,0000	0,6000	6,1600	0,6000	1,5133		

3.2 Análise fractal

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, verificado por MANDELBROT (1977), foi à 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.

Os resultados da Dimensão Fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem, Perímetro e Área, com onze repetições, para a bacia hidrográfica considerada, representativa do Argissolo é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensão fractal da composição da rede de drenagem, perímetro e área da bacia hidrográfica estudada

Características da bacia hidrográfica	Dimensão fractal (D) (Média)
Composição da rede de drenagem	1,4038
Perímetro	1,2816
Área	1,9052

Os valores da Tabela 2 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 à bacia, Figura 1. Para a determinação da Dimensão fractal do Perímetro e da área a contagem das caixas foi feita no contorno do divisor d'águas das 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 3.

4. CONCLUSÕES

A composição da rede de drenagem da bacia hidrográfica caracteriza-se por apresentar na primeira, segunda e terceira ordem de ramificação os seguintes valores de número, comprimento total e comprimento médio de segmentos de rios: (12; 3,76km e 0,3133 km); (3; 1,8km e 0,6km) e (1; 0,6km e 0,6km) respectivamente. Perímetro igual a 6,36 km e área igual a 2,48 km². Com esses valores e as condições ambientais que lhe são inerentes, a bacia hidrográfica é uma estrutura com Dimensão fractal (D) da Composição da Rede de Drenagem, 1,4038; do Perímetro, 1,2816 e da Área, 1,9052.

Estes valores obtidos, se comparados com os de outras bacias de mesma ordem de ramificação e após tratamento estatístico, se mostram mais precisos para caracterizar a bacia e a rede de drenagem em relação aos parâmetros convencionais.

Acredita-se que a aplicação da análise fractal em Bacias hidrográficas venha contribuir para novas pesquisas na área ambiental.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**. 1999. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

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 ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5, 2000, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. p.137.

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

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. **Revista Brasileira Ciências Solo**. v.14, n.2, p.195-203, 1990.

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

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

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

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin Geology Society American.** Colorado, v.56, p.275-370, 1945.

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.

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

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

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

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

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

APPLICATION OF THE FRACTAL ANALYSIS IN WATERSHED: A CONTRIBUTION TO CHARACTERIZE THE ENVIRONMENT

Abstract: The fractal dimension contributes to characterize natural and irregular phenomena with a bigger accuracy than conventional analysis, allowing an analysis with smaller distortions of reality (MANDELROT 1982). There was a purpose in this present paper to

show, principally, for those that are interested in the Environmental Engineering course a differentiated form observe the fractal object, a watershed of third order ramification, by to of fractal analysis. It was applied the fractal dimension to the watershed to search obtain the elements that better define them to make possible the comparison with the conventional parameters that define the relation infiltration/run-off of the soils. It is determined the fractal dimension to the contour line of the watershed that represents the perimeter; the circumscriptive surface the divider, that represents the area, and to the network drainage, representing the composition (number and total length and mean of the streams of the segments).

Kay-words: Watershed, Fractal analysis, Fractal dimension, Environmental Engineering.