

A dimensão fractal como método de análise da expansão urbana: um exemplo em cidades de porte médio do estado de São Paulo

Gracieli Trentin¹
Marcos César Ferreira¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IG
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Campinas - SP, Brasil
{gracieli, macferre}@ige.unicamp.br

Abstract. The methods for obtain the estimation of urban fractal dimension can be a new possibility to better understand the urban sprawl process, especially in the medium-sized cities, where the changes are faster and the focus of researcher are minor. The aim of this paper was to analyze the urban sprawl process in medium-sized cities by using the fractal dimension method associated with the density occupation. For this, four medium-sized cities in the São Paulo state were selected: Botucatu, Itapetininga, Piracicaba and São José do Rio Preto. These cities were selected according to differences in morphology, population and relief aspects. It was utilized remote sensing images of Landsat TM and historical maps comprehending the period of 1938 until 2005 for the analysis. The digital processing and a spatial analysis were developed. The results showed the efficiency in the use of fractal dimension method associated with the occupation density in the urban growth analysis. All urban areas showed the most elevated D values in the urban center and minor to periphery. While the traditional methods consider the total urban area and the increasing in time, the fractal dimension considers the irregularities of this growth by the differences in urban fill.

Palavras-chave: urban sprawl, fractal dimension, medium-sized cities, spatial analysis, image processing, expansão urbana, dimensão fractal, cidades de porte médio, análise espacial, processamento de imagem.

1. Introdução

A expansão das cidades tem motivado estudos em diversas áreas do conhecimento, uma vez que a compreensão deste processo requer que se conheçam os fatores físicos e socioeconômicos envolvidos e que se determinem o padrão urbano e a dinâmica das cidades. Novas metodologias para a análise do processo de expansão urbana são necessárias, sobretudo que considerem a irregularidade perimetral das cidades.

De acordo com pesquisa divulgada pela revista *Nature* (2010), a solução para muitos problemas globais estaria nas cidades. Segundo esta pesquisa, mais da metade da população mundial passou a viver em cidades no ano de 2008. Este número tende a aumentar em 2030, quando quase seis em cada 10 pessoas passarão a viver em áreas metropolitanas, em razão da grande atração econômica e social. Esta dinâmica populacional urbana repercute na evolução morfológica das cidades, uma vez que há o aumento na demanda por infra-estrutura urbana. Assim, compreender como ocorre a expansão urbana pode auxiliar na busca de alternativas para um crescimento ordenado da cidade.

Os métodos tradicionalmente utilizados para a análise da expansão urbana baseiam-se nos paradigmas da geometria euclidiana, que buscam a aproximação da forma das áreas urbanas às formas geométricas regulares. Tais métodos não são suficientes para a identificação da diversidade e complexidade dos fatores que influenciam na forma geométrica dos fenômenos espaciais (Longley e Batty, 1989). Segundo Mandelbrot (1983), a geometria euclidiana estuda maneiras de tratar e descrever as estruturas uniformes, regulares e contínuas, por meio de representações que buscam correspondência de igualdade e similaridade entre os objetos; a geometria fractal trata das estruturas fragmentadas, não-uniformes, irregulares e descontínuas, ou seja, estruturas naturais.

A abordagem fractal tem sido considerada eficaz na interpretação dos aspectos físicos e morfológicos no contexto espaço-temporal. Isto porque a utilização desta abordagem tem por objetivo a compreensão do tamanho, da homogeneidade, da diversidade e da distribuição da estrutura das áreas urbanas (Frankhauser, 1998; Longley e Mesev, 2002; Tannier e Pumain,

2005; Herold et al., 2005; Marques e Ferreira, 2006). A forma urbana pode ter um comportamento fractal que varia com a dinâmica de expansão urbana. Este comportamento pode ser mensurado a partir de métodos de cálculo da dimensão fractal, que permitem precisar com maior detalhe a análise da forma de crescimento e de preenchimento urbano.

Assim, valores de dimensão fractal muito variáveis ao longo de uma série temporal são indicativos de ocupação desordenada. Por outro lado, valores elevados de dimensão fractal representam organização característica de aglomerados, ou seja, as semelhanças entre a dimensão fractal das áreas centrais e periféricas são maiores, resultando no preenchimento mais homogêneo da cidade.

Com base na abordagem fractal e com vistas à utilização de novas metodologias para a compreensão dos padrões de crescimento das áreas urbanas, o objetivo deste trabalho foi analisar o processo de expansão urbana de cidades de porte médio (entre 100 e 500 mil habitantes) a partir da estimativa da dimensão fractal pelo método da densidade de preenchimento urbano. Para este estudo foram selecionadas quatro cidades de porte médio do estado de São Paulo: Botucatu, Itapetininga, Piracicaba e São José do Rio Preto (Figura 1).

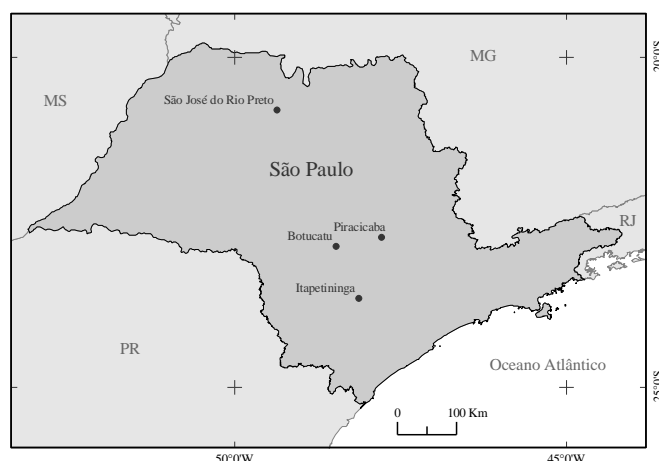


Figura 1. Localização das quatro cidades de porte médio no estado de São Paulo, utilizadas como objeto de estudo desta pesquisa.

Fonte: Adaptado de IBGE (2007).

2. Metodologia de Trabalho

A seleção das cidades se deu em função das diferenças que elas apresentam quanto à morfologia urbana, ao relevo predominante nos sítios urbanos, e também, ao tamanho populacional. Dessa forma, as quatro cidades selecionadas (Figura 1), mostram formas e áreas urbanizadas distintas bem como diferentes gradientes populacionais.

As áreas urbanas de Itapetininga e Piracicaba situam-se, respectivamente, na Depressão Periférica Paulista, Baixo Tietê e Médio Tietê; Botucatu está inserida nas *Cuestas* Basálticas e; São José do Rio Preto no Planalto Ocidental (IPT, 1981). A evolução da população urbana das quatro cidades no período entre 1985 e 2009, evidencia as diferenças quanto ao tamanho populacional (Figura 2). Em 2009, a população urbana era de 403.371 habitantes em São José do Rio Preto, 363.007 em Piracicaba, 131.817 em Itapetininga e 120.991 em Botucatu. Enquanto Piracicaba e São José do Rio Preto são consideradas cidades de porte médio, em todo o período, Botucatu e Itapetininga passam a sê-lo, a partir do ano de 1995.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, tomou-se como referência o período de 1938 até 2005, constituindo quatro datas de análise: 1938; 1985; 1995 e 2005. O material utilizado compreendeu mapas históricos para o ano de 1938 (IGG, 1938) e imagens orbitais do satélite Landsat TM 5, para os anos de 1985, 1995 e 2005 (INPE, 2010).

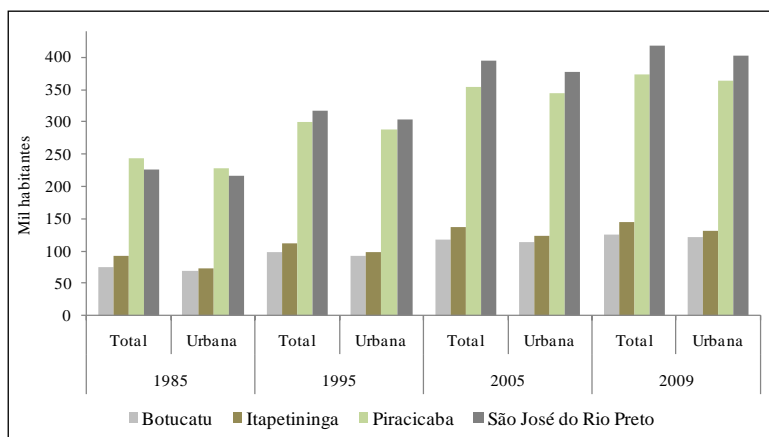


Figura 2. Evolução das populações total e urbana das quatro cidades no período de 1985 a 2009.
Fonte: Adaptado de SEADE (2010).

O processamento digital do material cartográfico e de sensoriamento remoto foi realizado nos sistemas de informação geográfica Idrisi Taiga (Eastman, 2009) e ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Nesta etapa as imagens e os mapas históricos foram georreferenciados com base nas imagens da data mais recente (2005). Em seguida, procedeu-se à correção atmosférica das imagens orbitais, ao recorte das mesmas com base no tamanho territorial de cada município e por fim à definição das composições coloridas. Para a vetorização em tela, das áreas urbanas, foram utilizadas três composições coloridas: RGB 357; RGB 347 e RGB 741. A etapa de vetorização das cidades foi realizada na escala 1:50.000, identificando-se somente a área urbana consolidada. A área urbana de 1938 foi identificada conforme a estrutura urbanizada contida nos mapas daquele ano.

Para a obtenção da dimensão fractal (D) pelo método da densidade de preenchimento urbano - conforme Frankhauser (1994; 1998), Batty e Longley (1994), Longley e Mesev (2002) e Marques e Ferreira (2006) - os arquivos das áreas urbanas para as quatro datas de análise foram importados e rasterizados com resolução de 30m, no SIG Idrisi Taiga.

A partir dos arquivos raster para o ano de 1938 foram obtidos os centros médios urbanos, dos quais derivaram os círculos concêntricos com raio de 500 metros, com a mesma resolução das áreas urbanas. Os círculos concêntricos foram sobrepostos às respectivas áreas urbanas, individualmente, por meio do módulo *Overlay* do Idrisi. Deste procedimento, resultaram as intersecções entre a área urbana de cada data e cada círculo com raio crescente a partir do centro urbano. Os valores de área total de cada círculo concêntrico e das intersecções obtidas foram calculados e tabulados, constituindo a base para o cálculo da D. A densidade de ocupação foi obtida por meio da Equação 1.

$$\rho(R) = \frac{N(R)}{A(r)} \quad (1)$$

onde, $\rho(R)$ é a densidade de preenchimento da área urbana, considerando-se a distância R em relação ao centro urbano, em cada uma das datas; $N(R)$ é a área urbana ocupada de cada círculo e; $A(r)$ refere-se à área total ocupada por cada círculo (Marques e Ferreira, 2006). Os valores de área, densidade de ocupação e raios ocupados pela área urbana a partir do centro da cidade, foram utilizados para o cálculo da D, com base na Equação 2:

$$D(R) = 2 + \frac{\log \rho(R)}{\log R} \quad (2)$$

onde D é a dimensão fractal de cada valor R a partir do centro urbano.

Para entender a dimensão fractal é necessário retornar à geometria euclidiana, na qual um ponto é considerado a dimensão zero (0), uma linha a dimensão um (1), uma área a dimensão dois (2) e um volume a dimensão três (3). Entretanto, na geometria fractal a dimensão possui valores fracionados, o que permite maior exatidão na determinação da dimensão de objetos com formas irregulares (Frankhauser, 1994). Assim, considera-se que $D=2$ quando a área do círculo estiver totalmente preenchida com área construída (valor de D igual à área do círculo). Quando $1 < D < 2$, o preenchimento do círculo não está completo, apresentando diferentes graus de fragmentação e D irá variar com a distância em relação ao centro; a fragmentação poderá aumentar em direção às bordas ou diminuir quando o preenchimento urbano desenvolver-se de forma homogênea ou concentrada e sem barreiras naturais ou antrópicas.

Os valores de D obtidos com a variação das distâncias concêntricas a partir do centro urbano foram representados graficamente, resultando na assinatura fractal do crescimento urbano de cada cidade. Também foram obtidos e analisados os valores médios da D ao longo da série temporal além do desvio padrão e do coeficiente de variação.

3. Resultados e Discussão

As cidades de Botucatu, Itapetininga, Piracicaba e São José do Rio Preto apresentaram grande dinâmica espacial no período de 1938 a 2005 (Figura 3). A morfologia apresentada pelas quatro áreas urbanas foi distinta no tempo e espaço. Enquanto as cidades de Botucatu, Itapetininga e Piracicaba apresentam formatos urbanos alongados, a forma urbana de São José do Rio Preto tendeu à circularidade.

A partir do processo de expansão urbana de cada cidade pode-se verificar que a forma urbana manteve as características morfológicas ao longo do tempo. Este fato pode estar relacionado aos elementos que caracterizam a situação e o sítio geográfico de cada cidade, como os físico-geográficos e o sistema viário. Estes elementos contribuem ao crescimento urbano, influenciando na localização de novos fragmentos de área urbana consolidada que surgem no entorno das cidades e ainda, ao próprio prolongamento da mancha principal. Entre as áreas urbanas em estudo, isto pode ser verificado em Piracicaba, onde o rio de mesmo nome atravessa a área urbana, e em Botucatu, cuja área urbana é limitada, a leste, pela presença do relevo cuneiforme. No entanto, a dinâmica temporal da forma urbana de São José do Rio Preto indica a existência de menores resistências espaciais ao crescimento urbano, uma vez que esta tende à circularidade (Figura 3).

O maior crescimento urbano em todas as cidades ocorreu entre os anos de 1938 e 1985, que representa o maior intervalo temporal do período analisado. Este fato também se vincula às políticas de desenvolvimento que caracterizaram este período, sobretudo entre as décadas de 1960 e 1970, em virtude do processo de desconcentração industrial e dos planos nacionais de desenvolvimento (Lencioni, 1998; Negri, 1996). Consequentemente, de acordo com a Figura 4, entre os anos de 1938 e 1985 ocorreu o maior aumento em área ocupada pela estrutura urbana. Considerando-se o perímetro ocupado pelas áreas urbanas neste período, verifica-se que houve maior variação nos valores, o que aponta uma maior irregularidade das bordas urbanas. Embora São José do Rio Preto possua a maior área ocupada, seu perímetro urbano é menor que o de Piracicaba. Da mesma forma, Botucatu e Itapetininga, que apresentam praticamente o mesmo comportamento quanto à ocupação de novas áreas para fins urbanos, têm diferenças na extensão do perímetro urbano. O perímetro de Itapetininga apresentou-se maior em 1985 e 1995, indicando maior irregularidade de borda.

As assinaturas fractais obtidas a partir dos cálculos de D pela densidade de preenchimento, para as quatro cidades, permitiram a identificação de padrões morfológicos urbanos (Figura 5). As áreas urbanas analisadas apresentaram maiores valores de D nas proximidades de suas áreas centrais; com o aumento das distâncias em relação ao centro urbano - ou seja, em direção às áreas periféricas - ocorreu a diminuição de D .

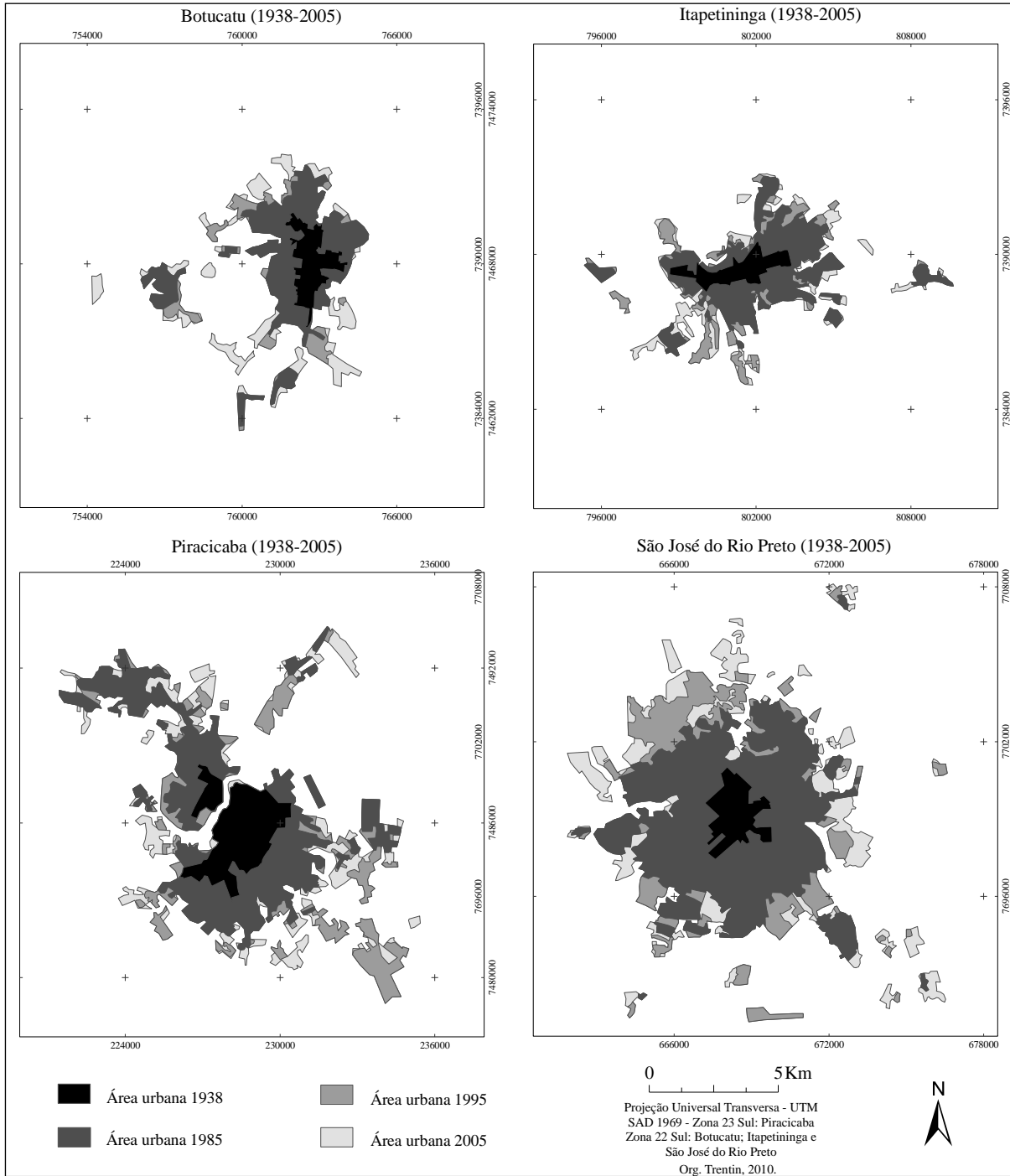


Figura 3. Expansão urbana das quatro cidades de porte médio no período de 1938 a 2005.

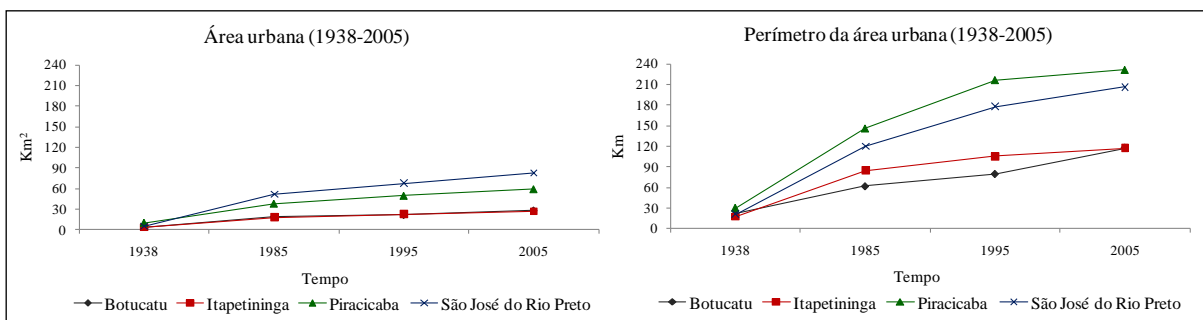


Figura 4. Área e perímetro urbanos no período de 1938 a 2005.

A maior variação nos valores de D ocorreu nas cidades de Itapetininga e Botucatu, enquanto em Piracicaba e São José do Rio Preto a variação foi menor e os valores de D mais elevados. O preenchimento urbano ocorreu de forma mais homogênea em São José do Rio Preto, uma vez que os valores de D mantiveram-se iguais ou muito próximos a 2,0 até aproximadamente 3,5Km do centro urbano - indicativos de densidade máxima de ocupação urbana. A maior heterogeneidade no preenchimento urbano ocorreu em Itapetininga e, por consequência seus valores de D foram mais variáveis ao longo do tempo.

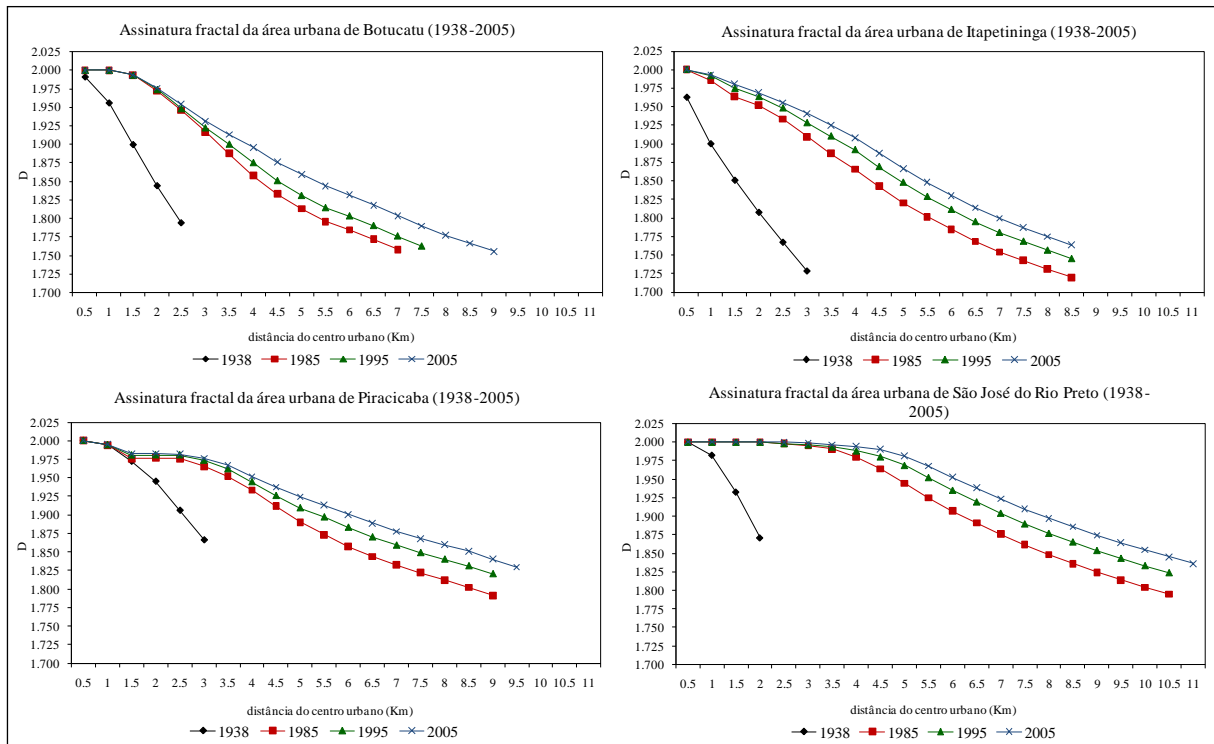


Figura 5. Assinaturas fractais das quatro áreas urbanas no período de 1938 a 2005.

Na assinatura fractal de Piracicaba verificou-se um “vale” nos valores de D próximos ao centro urbano (entre 1,5 e 2,5Km). Isto pode ter ocorrido em consequência da impedância imposta pelo curso do rio Piracicaba, que corta a área urbana, e contribui à irregularidade e fragmentação da forma urbana. Este fato possibilita observar, por exemplo, a menor fragmentação da área central de Botucatu se comparada à de Piracicaba – ainda que seja grande, a diferença populacional entre estas cidades (Figura 6); da mesma forma, Itapetininga, que embora possua população relativamente próxima a de Botucatu (Figura 2), apresenta fragmentação superior a de Botucatu.

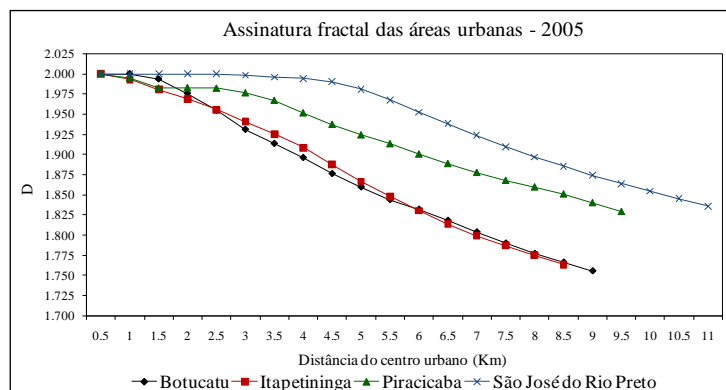


Figura 6. Assinaturas fractais das áreas urbanas para o ano de 2005.

De acordo com Marques e Ferreira (2006), nas proximidades do centro urbano a homogeneidade na ocupação urbana é maior e, à medida que os valores de D se distanciam do centro urbano, a heterogeneidade na densidade de preenchimento tende a aumentar. Por estes motivos os valores médios de D teriam maior validade, conforme Batty e Longley (1994), somado ao fato do processo de crescimento urbano ser maior nas áreas periféricas.

A partir dos valores médios de D (Figura 7), valores de desvios-padrão e coeficientes de variação (Tabela 1), foi possível estimar o comportamento de D para cada área urbana, na série temporal. As assinaturas fractais de Piracicaba e São José do Rio Preto apresentaram valores médios de D superiores às outras cidades, indicando menor fragmentação de suas áreas urbanas.

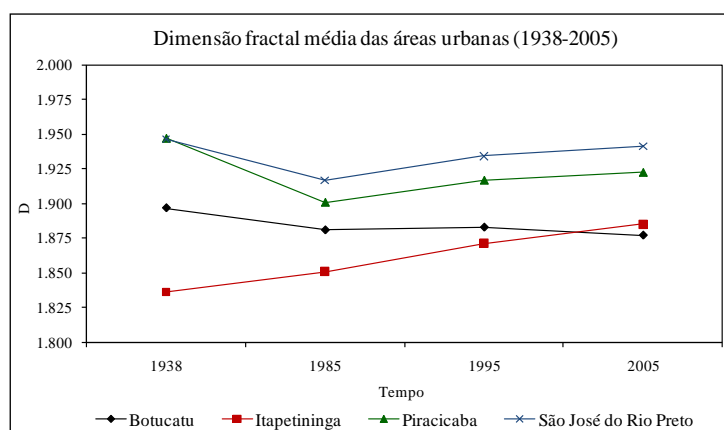


Figura 7. Comportamento do valor médio de D, para as quatro áreas urbanas, no período de 1938 a 2005.

Tabela 1. Valores de desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV) da dimensão fractal (D), no período de 1938 a 2005.

Cidades	1938		1985		1995		2005	
	DV	CV (%)	DV	CV (%)	DV	CV (%)	DV	CV (%)
Botucatu	0.0803	4.235	0.0902	4.797	0.0860	4.566	0.0844	4.495
Itapetininga	0.0867	4.722	0.0943	5.094	0.0870	4.650	0.0810	4.296
Piracicaba	0.0525	2.696	0.0728	3.831	0.0619	3.232	0.0573	2.981
São José do Rio Preto	0.0579	2.974	0.0763	3.979	0.0648	3.350	0.0601	3.096

A maior variação nos valores de D para as quatro cidades ocorreu no ano de 1985. A intensidade de variação de D entre as cidades também se manteve ao longo do período analisado, exceto na última data de análise, entre Botucatu e Itapetininga. A área urbana de Botucatu revelou maior variação nos valores de D nesta data, o que pode indicar a não consolidação de seu processo de urbanização. Já Itapetininga apresentou aumento contínuo nos valores médios de D, o que aponta o preenchimento dos espaços vazios do entorno urbano.

4. Conclusões

A utilização do método da estimativa de D pela densidade de preenchimento urbano, a partir de mapas e imagens orbitais, se mostrou eficiente para a análise do processo de expansão de cidades de porte médio. As assinaturas fractais comprovaram a tendência de maior densidade de ocupação nas áreas centrais e diminuição em direção à periferia. A partir dos valores de D para cada cidade, foi possível diferenciar a distribuição do preenchimento urbano, no tempo e no espaço, indicando homogeneidade ou heterogeneidade da ocupação do solo, em função da distância em relação ao centro urbano.

Embora as maiores cidades deste estudo - São José do Rio Preto e Piracicaba - tenham apresentado os maiores valores médios de D, os resultados mostraram que a maior ou menor

fragmentação urbana não está necessariamente vinculada ao tamanho populacional. No entanto, a forma urbana, influenciada pelas características físico-geográficas do espaço em que cada cidade se insere, tem relação com o comportamento de D no tempo, uma vez que induz a maior ou menor fragmentação urbana.

Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo), processo n.º. 2009/53035-0.

Referências Bibliográficas

- Batty, M.; Longley, P. **Fractal cities: a geometry of form and function**. London: Academic Press, 1994. 394p.
- Cities: The urban equation. **Nature**, v. 467, p. 899, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/467899a>>. Acesso em 25 out. 2010.
- Frankhauser, P. **La fractalité des structures urbaines**. Paris: Anthropos, 1994. 291p.
- Frankhauser, P. The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations. **Population**, v. 10, n. 1, p. 205-240, 1998.
- Herold, M. et al. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 29, p. 369-399, 2005.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. **Malha municipal digital**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais/municipio_2007/Malha_Municipal_Digital_2007_2500/Disseminacao_2007/Proj_Geografica/>.
- Instituto de Pesquisas Espaciais. INPE. Catálogo de Imagens. **Satélite Landsat TM 5**. São José dos Campos: INPE, 1985; 1995; 2005. 3 cenas. Órbita/ponto: 220/76. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 04 mar. 2010.
- Instituto Geográfico e Geológico. IGG. **Mapeamento dos municípios do estado de São Paulo**. São Paulo: IGG/Secretaria da Agricultura, Indústria e Comércio, 1938. 2 Mapas. Escala 1:100.000.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. IPT. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, vol. II, 1981. (Publicação IPT 1183). Escala 1:1.000.000.
- Lencioni, S. Mudanças na metrópole de São Paulo (Brasil) e transformações industriais. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 12, p.27-42, 1998.
- Longley, P. A.; Batty, M. Fractal measurement and line generalization. **Computers & Geosciences**. v. 15, n. 2, p. 167-183, 1989.
- Longley, P. A; Mesev, V. Measurement of density gradients and space-filling in urban systems. **Papers in Regional Science**, v. 81, p. 1-28, 2002.
- Mandelbrot, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman and Company, 1983. 468p.
- Marques, M. L.; Ferreira, M. C. Análise da densidade de ocupação do aglomerado urbano da região metropolitana de São Paulo pela estimativa de dimensão fractal. **Geografia**, v. 31, n. 2, p. 293-316, 2006.
- Negri, B. **Concentração e desconcentração industrial de São Paulo (1880-1990)**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1996. 242p.
- São Paulo (Estado). Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. SEADE. **Informações dos Municípios Paulistas**. Disponível em <<http://www.seade.gov.br/produtos/imp/index.php>> Acesso em: 10 set. 2010.
- Tannier, C.; Pumain, D. Fractals in urban geography: a theoretical outline and an empirical example. **Cybergeo: European Journal of Geography** [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 307, mis en ligne le 20 avril 2005. URL: <http://www.cybergeo.eu/index3275.html>.