

Detecção de padrões morfológicos intra-urbanos a partir de interpolação por Krigagem Ordinária dos valores de lacunaridade obtidos em imagens de satélite de alta resolução espacial

Mauro Normando Macêdo Barros Filho¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco - UFPE/MDU
Caixa Postal 7809 Cidade Universitária - CEP: 50732-970 Recife, PE
mbarrosfilho@gmail.com

Abstract. This paper describes a method for detecting intra-urban morphological patterns through interpolation of lacunarity values generated from high spatial resolution satellite image samples. This method was applied in an area with 1,500 x 1,500 meters in size, located in the city of Recife (Brazil), which comprises two informal settlements called Brasília Teimosa and Pina/Encanta Moça. These informal settlements are separated to each other by a formal urban area. Firstly, 168 lacunarity values were extracted from QuickBird image samples of this area, with 75 x 75 meters in size and 0.60 meters in spatial resolution. Then, these values were assigned to georeferenced centroids of each image sample and interpolated by Ordinary Kriging. Finally, the generated image was classified through a K-Means algorithm. The results showed that the lacunarity values were very sensitive to the texture variation of the selected images. Pixels with higher gray levels have higher lacunarity, and correspond to intra-urban areas composed of relatively big buildings and large roads. While those pixels with lower gray levels have lower lacunarity, and correspond to more dense and compact intra-urban areas composed by small buildings and narrow and tortuous alleys. In the end it was possible to detect different intra-urban morphological patterns between the formal and informal areas, but within the informal areas as well.

Palavras-chave: high spatial resolution satellite images, Lacunarity, Ordinary Kriging, intra-urban morphology, imagens de satélite de alta resolução espacial, Lacunaridade, Krigagem Ordinária, morfologia intra-urbana.

Introdução

Métodos de extração e classificação de imagens de alta resolução espacial são importantes instrumentos de planejamento e gestão urbanos, especialmente nos países em desenvolvimento que carecem de mapas precisos para representar, analisar e gerenciar o rápido crescimento em assentamentos informais. Apesar dos recentes avanços, a caracterização de padrões morfológicos intra-urbanos a partir de imagens de satélite de alta resolução continua sendo um grande desafio. Áreas urbanas são compostas de objetos com diferentes formas e materiais. Imagens de alta resolução especial dessas áreas representam uma complexa combinação de superfícies com diferentes reflectâncias espectrais e, geralmente, possuem baixa resolução espectral, dificultando a diferenciação entre distintas feições urbanas com semelhante reflectâncias (Myint et al, 2006).

Algoritmos de classificação espectral baseados em píxel, como o de Máxima Verossimilhança, não levam em consideração a textura da imagem, não oferecendo bons resultados. A textura descreve o arranjo e a variabilidade espacial dos tons de cinza de uma imagem. Quanto maior a variabilidade, menos homogênea ou uniforme será a textura. Análises de texturas de imagens permitem reconhecer e distinguir arranjos espaciais de valores de níveis de cinza, auxiliando caracterização de padrões morfológicos intra-urbanos. Entretanto, a textura depende fortemente da escala (resolução e extensão) da imagem analisada. Análises de textura baseadas no conceito de lacunaridade permitem caracterizar padrões espaciais em diferentes escalas.

O conceito de lacunaridade foi originalmente introduzido por Mandelbrot (1982) para descrever e quantificar o desvio de objetos fractais de sua invariância translacional. O termo provém do latim “lacuna”, e está relacionado com a distribuição dos vazios em uma estrutura espacial (Plotnick et al, 1996). Medidas baseadas em lacunaridade têm sido utilizadas no

sensoriamento remoto, devido à sua habilidade em distinguir diferentes padrões de textura em imagens (Henebry e Kux, 1995), se mostrando eficientes na melhoria da acurácia nos métodos de segmentação (Du e Yeo, 2002) e classificação de imagens de áreas urbanas (Myint et al, 2006). Além disso, essas medidas têm revelado a possibilidade de distinguir padrões morfológicos entre favelas e não-favelas, e entre favelas com diferentes padrões de parcelamento, densidade e níveis de urbanização (Barros Filho e Sobreira, 2005).

Experimentos realizados com imagens Ikonos (Barros Filho e Sobreira, 2005), Quickbird (Barros Filho e Sobreira, 2007) e CBERS-2 (Barros Filho, 2007) de cidades brasileiras mostraram ser possível distinguir padrões morfológicos de áreas urbanas com diferentes condições de habitabilidade. Nesses trabalhos, os valores de lacunaridade foram estimados a partir de uma amostra de imagem localizada no interior de áreas urbanas pré-classificadas em função de suas condições de habitabilidade. No entanto, em assentamentos com dimensões relativamente grandes, geralmente existem diferentes padrões morfológicos no seu interior. Além disso, muitas vezes, a transição entre padrões morfológicos de assentamentos informais e formais não ocorre abruptamente, mas de forma contínua e gradual. Dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia que realize uma coleta extensiva de amostras em diversas localidades de uma mesma área intra-urbana para melhor identificar e compreender os seus padrões morfológicos.

Diante da dificuldade em adquirir valores de lacunaridade para toda a região de estudo, fez-se necessário o uso de técnicas de interpolação. Entre as diversas técnicas de interpolação, a Krigagem Ordinária é considerada como o melhor estimador linear não-tendencioso (*Best Linear Unbiased Estimated* - BLUE). Como estimador linear, assume que o valor desconhecido pode ser estimado por uma combinação linear dos pesos dos valores observados nas amostras vizinhas. Como estimador não-tendencioso, assume que a média global dos erros, ou seja, a média das diferenças entre os valores estimados e os valores observados seja nula. Isso significa que o processo a ser estimado tem uma média desconhecida, mas constante, cujo valor é igual à média dos valores observados nas amostras. Portanto, os pesos são escolhidos de maneira que o valor médio estimado é restringido pelo valor da média das amostras, sendo para isso necessário que a soma dos pesos seja igual a 1 (Soares, 2000).

Dentro desse contexto, o presente trabalho constrói um modelo contínuo de representação do espaço intra-urbano, utilizando-se a técnica de Krigagem Ordinária para interpolar os valores de lacunaridade estimados em 168 amostras de imagem QuickBird da área em estudo. Para isso, o artigo foi dividido em três partes. Na primeira, é caracterizada a área objeto de estudo. Na segunda, é explicada a metodologia adotada. E, finalmente, na última, são tecidos alguns comentários sobre os resultados obtidos.

1. Área objeto de estudo

A área objeto de estudo está localizada na zona sul da cidade do Recife, abrangendo o bairro de Brasília Teimosa e parte do bairro do Pina. Brasília Teimosa é um assentamento informal de baixa renda situado em uma península delimitada pelo rio Capibaribe e o oceano Atlântico, próxima do centro histórico da cidade e do valorizado bairro de Boa Viagem, (figura 1). Sua paisagem é uma das mais valorizadas do Recife e tais condições a colocam como alvo de interesse do mercado imobiliário formal (Lacerda et al, 2008) (figura 2). A ocupação teve início em 1947, e, durante o período de construção da capital federal, sua comunidade passou a contar com um atuante conselho de moradores, o que favoreceu a sua resistência às tentativas de expulsão, daí a razão de seu nome. Em 1983, o assentamento passou a ser reconhecido como uma Zona Especial de Interesse Social (Zeis), sendo legalmente protegido contra a especulação imobiliária e beneficiado com infra-estrutura e serviços urbanos básicos. Segundo os dados do Censo Demográfico, em 2000, Brasília

Teimosa apresentava 20.464 habitantes, morando em 5.168 domicílios, e ocupando uma área de 64,78 hectares, sendo o bairro mais denso do Recife.

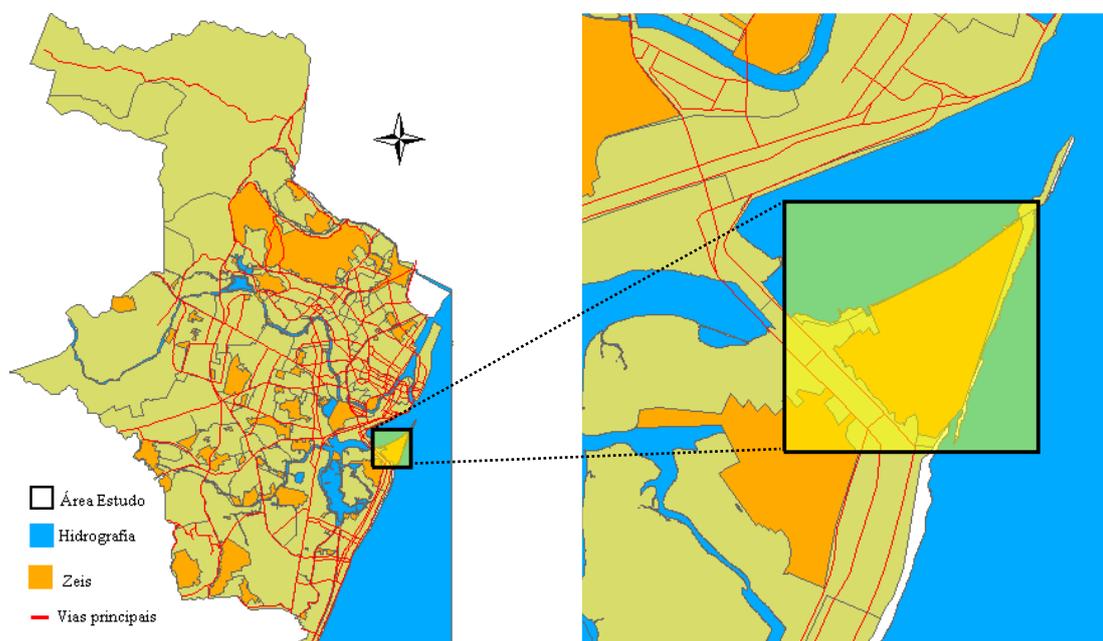


Figura 1. Localização da área objeto de estudo

Na extremidade sudoeste da área de estudo encontra-se uma parte da Zeis Pina/Encanta Moça (figura 1 e no segundo plano da figura 4), outro assentamento informal de baixa renda do Recife. Segundo os dados do Censo Demográfico, em 2000, a Zeis Pina/Encanta Moça apresentava 15.313 habitantes ocupando uma área de 64 hectares, o que lhe conferiu uma densidade de aproximadamente 240 pessoas por hectare. Entremeadada pelos assentamentos informais de Brasília Teimosa e Pina/Encanta Moça, situa-se uma área urbana formal recortada pelas avenidas Engenheiro Antônio de Góes e Herculano Bandeira, dois importantes eixos viários que interligam os bairros da zona sul do Recife ao resto da cidade (figura 3). Tal área apresenta edificações, lotes e vias com dimensões relativamente maiores que os encontrados nos assentamentos de Brasília Teimosa e do Pina/Encanta Moça.



Figura 2. Vista Nordeste da área objeto de estudo



Figura 3. Vista Noroeste da área objeto de estudo



Figura 4. Vista Sudoeste da área objeto de estudo

2. Metodologia

Para a detecção dos padrões morfológicos na área objeto de estudo foi realizado um recorte da imagem de satélite QuickBird da cidade do Recife ortorretificada, em projeção UTM e datum SAD-69. Esta imagem, coletada em 1 de abril de 2005, é uma composição colorida de 3 bandas espectrais, com resolução espacial de 60 cm e resolução radiométrica de 8 bits (figura 1). A coordenada do canto inferior esquerdo do recorte é de 291.900 m e 9.105.200 m, e a coordenada do canto superior direito é de 293.400 m e 9.106.700 m, o que corresponde a uma área de 2.500 x 2.500 píxeis (1.500 x 1.500 metros).

A metodologia proposta foi composta de 5 etapas principais. A primeira etapa consistiu no realce da imagem recortada por meio da aplicação da técnica de Análise de Componentes Principais (ACP), essa técnica extraiu a informação comum ou repetida nas 3 bandas espectrais originais, gerando 3 novas imagens (CP-1, CP-2 e CP-3) não correlacionadas entre si. A primeira imagem (figura 5) foi escolhida como referência para os procedimentos subsequentes, por conter a informação que é comum a todas as bandas originais e por representar as maiores variações da reflectância espectral geral das bandas originais.

A segunda etapa consistiu no desenho, no programa AutoCad, de uma grade contendo 400 polígonos georreferenciados, cada qual com 125 x 125 píxeis ou 75 x 75 metros (figura 6). Tais polígonos foram convertidos em arquivo SHP e importado para o SPRING (Câmara et al, 1996). Neste programa, a grade foi sobreposta à imagem CP-1, servindo de máscara para a extração de 168 amostras desta imagem, totalmente inseridas dentro do limite dos bairros de Brasília Teimosa e Pina. Em seguida, uma chave-primária foi criada na tabela de atributos de seus respectivos polígonos.



Figura 5. Imagem PC-1 de Brasília Teimosa

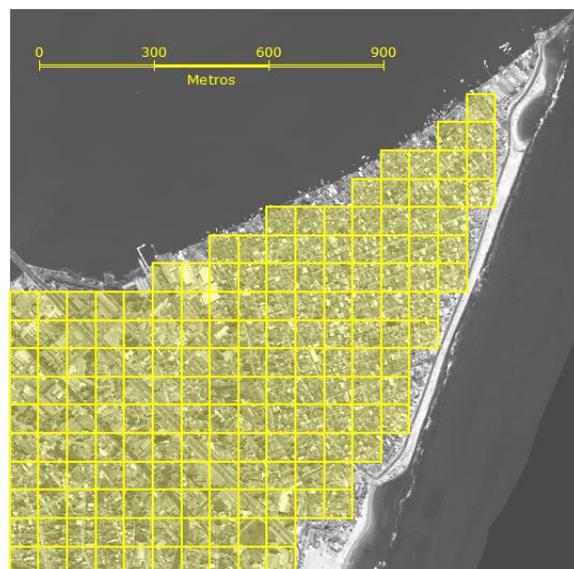


Figura 6. Grade sobreposta à imagem PC-1

A terceira etapa consistiu em estimar os valores de lacunaridade de cada uma das 168 amostras da imagem CP-1. No cálculo de lacunaridade, foi aplicado o algoritmo *Differential Box-Counting* (DBC) proposto por Dong (2000), por apresentar melhor desempenho que o algoritmo de *Gliding-Box* na distinção de texturas urbanas (Barros Filho e Sobreira, 2008). Na parametrização do algoritmo, foram definidas as imagens em tons de cinza, foi escolhida a cor preta como o plano de fundo da imagem e foram considerados 5 tamanhos de caixa (2, 4, 8, 16 e 32 píxeis). Uma tabela de atributos em DBF foi elaborada, contendo uma chave-primária

e os valores de lacunaridade obtidos em cada tamanho de caixa. Esta tabela foi vinculada à tabela de atributos dos 168 polígonos das amostras de imagens selecionadas.

A quarta etapa consistiu em gerar pontos amostrais localizados no centro de massa de cada polígono. Cada ponto foi associado aos valores de lacunaridade obtidos no algoritmo de DBC com caixas de 2 x 2 píxeis. Tal tamanho de caixa foi escolhido em razão de permitir maior discriminação entre padrões de habitabilidade intra-urbanos (Barros Filho, 2008). A partir dos valores de lacunaridade nos pontos amostrais, semivariogramas experimentais foram gerados nas direções de 0, 45, 90 e 135 graus, utilizando 10 passos, com incremento de 75 m e tolerância de 37,5 m. As curvas dos semivariogramas forneceram informações sobre a correlação espacial, para otimizar os pesos e os raios de influência a serem utilizados na interpolação das amostras e, conseqüentemente, detecção de padrões espaciais.

A curva do semivariograma experimental foi ajustada a um modelo exponencial, obtendo-se efeito pepita de 0.014, alcance de 1.232,659 m e contribuição de 0.002. Em seguida, os pontos amostrais foram interpolados por Krigagem Ordinária, e uma imagem de 30 x 30 píxeis foi gerada com resolução espacial de 50 metros. Esta imagem foi recortada através da aplicação de uma máscara correspondendo ao limite dos bairros de Brasília Teimosa e Pina.

Finalmente, na quinta etapa, foi realizada uma classificação não-supervisionada da imagem gerada pela interpolação, utilizando o algoritmo de k-médias. Para isso, determinou-se uma quantidade de 5 classes espectrais, e o algoritmo definiu, arbitrariamente, vetores de média para cada um dessas classes e cada píxel da imagem foi associado à classe cujo vetor de média estava mais próximo. Após todos os píxeis serem associados, o algoritmo redefiniu os vetores de médias de cada classe e o processo continuou em 10 sucessivas iterações.

3. Resultados e discussão

O comportamento dos semivariogramas experimentais gerados nas 4 direções consideradas (0, 45, 90 e 135 graus) mostra que é possível identificar certo grau de dependência espacial entre os dados analisados (figura 7). Com exceção do semivariograma na direção de 45 graus, verifica-se que, em geral, à medida que aumenta a separação entre os pares de amostras, a correspondente variância entre os mesmos também aumenta. Em certo momento, entretanto, o aumento da distância entre os pares não mais corresponde ao aumento na média do quadrado da diferença entre os pares de valores, e o semivariograma atinge um determinado patamar *C*. A partir desse ponto, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre os pares de amostras torna-se, praticamente, constante com a distância. Como mostra a figura 7, a dependência espacial é mais contínua e significativa na direção de 135 graus. Esta direção coincide com a direção das avenidas Engenheiro Antônio de Góes e Herculano Bandeira que, como descrito anteriormente, fazem parte da área formal que entremeia os assentamentos informais de Brasília Teimosa e do Pina/Encanta Moça (figuras 1 e 3).

A superfície gerada com a interpolação dos valores de lacunaridade com caixas de 2 x 2 píxeis está apresentada da figura 8. Os píxeis mais claros desta imagem apresentam valores de lacunaridade mais elevados. A figura 9 apresenta o resultado da classificação da imagem da figura 8 com o algoritmo não-supervisionado de K-Médias. Os agrupamentos nas cores verde, amarelo, azul, marrom e vermelho representam, nesta ordem, áreas com valores decrescentes de lacunaridade. Comparando as figuras 5, 8 e 9 entre si, é possível verificar que as áreas com maiores valores de lacunaridade (representadas pelos píxeis mais claros na figura 8, e pelas cores verde, amarela e azul na figura 9) estão concentradas no quadrante sudoeste da imagem, e correspondem às áreas no entorno das avenidas Herculano Bandeira e Engenheiro Antônio de Góes, e à área de um estaleiro na margem fluvial de Brasília Teimosa (figura 5), composto por edificações com dimensões significativamente maiores que as demais.

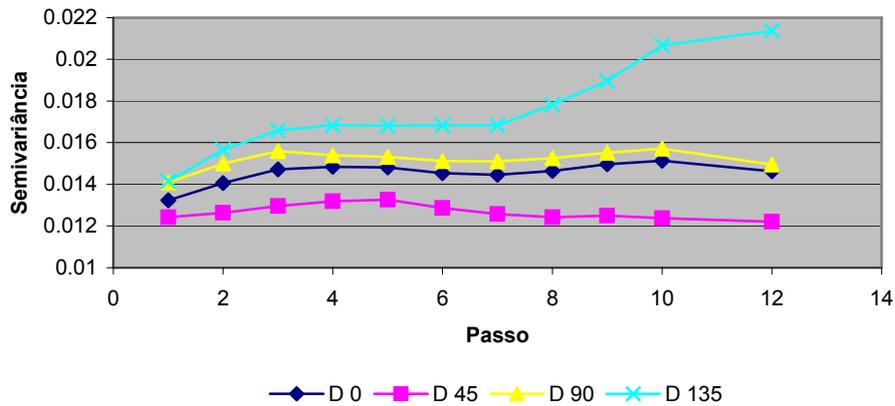


Figura 7. Semivariograma experimentais nas direções de 0, 45, 90 e 135 graus

Por outro lado, verifica-se também que as áreas com valores mais inferiores de lacunaridade (agrupamentos de píxeis em tons mais escuros na figura 8, e nas cores vermelho e marrom na figura 9) estão concentradas nos assentamentos informais do Pina e de Brasília Teimosa (ver os limites das Zeis na figura 1). É possível também perceber, especialmente na figura 8, que o padrão morfológico dentro desses assentamentos não é homogêneo. As áreas mais próximas da cidade formal apresentam valores de lacunaridade mais altos que as áreas mais afastadas. No entanto, em Brasília Teimosa, é possível encontrar uma área bem afastada da cidade formal, na ponta da península, com valores de lacunaridade mais elevados. Isto se deve a presença de uma marina nesse local que ocupa um grande terreno com edificações de grande porte, como garagens de barcos (figura 5).

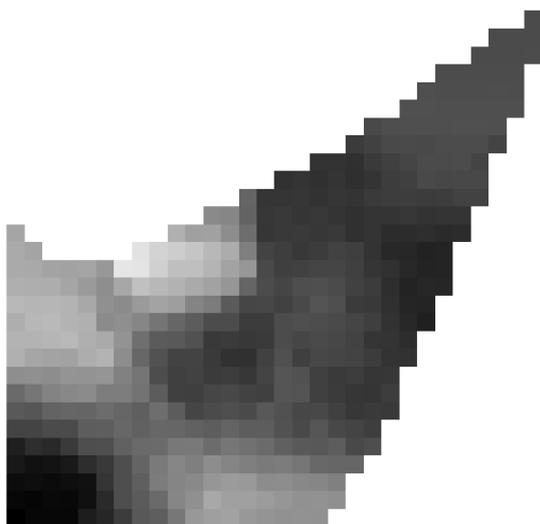


Figura 8. Superfície gerada pela interpolação por Krigagem Ordinária

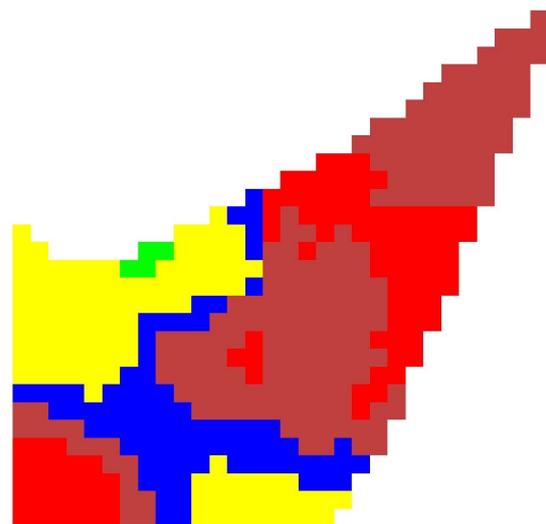


Figura 9. Classificação não-supervisionada por K-Médias em 5 classes e 10 iterações

4. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver um método para detectar de padrões morfológicos intra-urbanos a partir da interpolação de valores de lacunaridade obtidos em amostras de imagem de alta resolução espacial. Este método foi aplicado em uma área de 1.500 x 1.500 metros, na cidade do Recife, constituída por dois assentamentos informais (Brasília Teimosa e Pina/Encanta Moça) separados entre si por uma área formal. 168 valores de lacunaridade foram extraídos de amostras de imagem QuickBird dessa área com extensão de 75 x 75 metros e resolução espacial de 60 cm. Tais valores foram associados a pontos georreferenciados localizados no centróide de cada amostra e interpolados por Krigagem Ordinária. Finalmente, a imagem gerada foi classificada por K-Médias.

Os resultados obtidos mostraram que os valores de lacunaridade foram muito sensíveis às variações de texturas encontradas na imagem selecionada. De um lado, os agrupamentos de píxeis com tons mais claros de cinza apresentam valores de lacunaridade mais elevados. Em geral, tais agrupamentos correspondem às áreas intra-urbanas compostas por elementos morfológicos de dimensões relativamente grandes, como as tipologias edilícias de galpões, concessionárias de veículos, depósitos, armazéns e garagens de barcos, e os grandes lotes vazios existentes no local. De outro lado, os agrupamentos de píxeis com tons mais escuros de cinza apresentaram valores mais baixos de lacunaridade. Esses agrupamentos estão associados às áreas intra-urbanas mais densas e compactas, compostas por edificações relativamente pequenas, assim como becos estreitos e tortuosos.

Dessa forma, foi possível detectar diferentes padrões morfológicos na área objeto de estudo, não somente entre os assentamentos informais (Brasília Teimosa e Pina/Encanta Moça) e o entorno formal (áreas lindeiras às avenidas Herculano Bandeira e Engenheiro Antônio de Góes), mas também dentro dos próprios assentamentos informais (nas áreas próximas ao entorno formal e nas áreas ocupadas pelo estaleiro e pela marina em Brasília Teimosa). Novos experimentos vêm sendo desenvolvidos com a interpolação de valores de lacunaridade obtidos em diferentes tamanhos de caixas, e os resultados de uma análise comparativa das imagens geradas com tais interpolações serão futuramente publicados.

Agradecimento

O autor agradece a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo suporte financeiro a esta pesquisa por meio da Bolsa de Fixação de Pesquisador BFP-0055-6.0407.

Referências

- Barros Filho, M. N. M. Image size effects on lacunarity-based texture analysis of urban areas. In: Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, 13., 2008, Havana, Cuba. **Anais...** Havana: Cuba, 2008.
- Barros Filho, M. N. M. e Sobreira, F. J. A. Accuracy of lacunarity algorithms in texture classification of high spatial resolution images from urban areas. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing, China, 2008, p.417-422.
- Barros Filho, M. N.M. e Sobreira, F. J. A. Urban textures: a multi-scale analysis of sociospatial patterns. In: Proceedings of X Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM), 10., 2007, Foz de Iguaçu, Brasil. **Anais...** São Carlos: USP, 2007.

Barros Filho, M. N. M. A morfologia da habitabilidade intra-urbana: o uso de imagem CBERS-2 na análise de padrões morfológicos no Recife In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p.769 – 776 CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2009/>>. Acesso em: 28 out. 2008.

Barros Filho, M. N. M. **As múltiplas escalas da diversidade intra-urbana**: uma análise de padrões socioespaciais no Recife. 2006. 296 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

Barros Filho, M. N. M. e Sobreira, F. J. A., 2005. **Analysing spatial patterns in slums: a multiscale approach**. In: CASA Working Papers, 87, Centre for Advanced Spatial Analysis. University College London, London, UK. Disponível em: <http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper87.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2006.

Burrough, P. A. e McDonnell, R. **Principles of geographical information systems**: spatial information systems and geostatistics. London: Oxford University Press, 1998.

Câmara, G. et al. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, ano 20, v. 3, p. 395-403, May-Jun 1996.

Dong, P. Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis. **International Journal of Remote Sensing**, 21(17), p. 3369-3373, 2000.

Du, G. e Yeo, T.S. A novel lacunarity estimation method applied to SAR image segmentation. **IEES Transitions on Geoscience and Remote Sensing**, S.I., v. 40, n. 12, 2002.

Henebry, G.M. e Kux, H.J.H. Lacunarity as a texture measure for SAR imagery. **International Journal of Remote Sensing**, S.I, n.16, p.565-571, 1995.

Lacerda, N. et al. Funcionamento do mercado de habitações nas áreas pobres da Região Metropolitana do Recife: uma primeira aproximação. In: Pereira, P. C. X.; Hidalgo, R. (Eds.). **Producción inmobiliaria y reestructuración metropolitana en América Latina**. Chile: Pontífica Universidad Católica de Chile, 2008. p. 231-244.

Mandelbrot, B.B. **The fractal geometry of nature**. New York: Freeman, 1992.

Myint, S. et al. Urban textural analysis from remote sensor data: lacunarity measurements based on the differential box counting method. **Geographical Analysis**, 38, p. 371-390, 2006.

Plotnick, R. et al. Lacunarity analysis: a general technique for the analysis of spatial patterns. **Physical Review**, 55(5), p.5461-5468, 1996.

Soares, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: Instituto Superior Técnico (IST) Press, 2000.