

Convergência de métodos de descrição da forma urbana: análise de textura de imagens de satélite e análise gráfica visual

Luiz Amorim

Universidade Federal de Pernambuco, Avenida dos Reitores, s/n, Cidade Universitária, 50741-530 Recife PE, Brasil. E-mail: amorim@ufpe.br

Mauro Barros Filho

Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, 58429-900 Campina Grande PB, Brasil.
E-mail: mbarrosfilho@gmail.com

Artigo revisto recebido a 30 de Setembro de 2017

Resumo. *O artigo apresenta os resultados de uma investigação que visa integrar diferentes abordagens à análise da forma urbana. A metodologia proposta integra duas linhas de investigação: i) análise de textura de imagens de satélite de alta resolução com o uso de medidas fractais e de lacunaridade para descrever a distribuição espacial de pixels com níveis de cinza semelhantes; ii) Análise Gráfica Visual, do inglês Visual Graph Analysis (VGA), que descreve propriedades visuais de sistemas espaciais. Uma análise de segunda ordem é proposta para descrever a textura dos mapas VGA e investigar em que medida os padrões subjacentes de configuração e textura estão correlacionados. Os resultados apresentados demonstram a robustez dos procedimentos para identificar padrões sócio-espaciais distintos.*

Palavras-chave: lacunaridade, sintaxe espacial, análise de textura, análise gráfica visual

Introdução

A forma urbana é resultante de uma complexa interação entre diversos fenómenos sociais, económicos e culturais, produzidos, reproduzidos e acumulados no tempo e no espaço. Sua descrição e análise a partir de uma única abordagem sempre será limitada e incompleta. Diferentes abordagens em morfologia urbana vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas. Apesar de suas fragilidades, há pontos que as conectam (Oliveira, 2016). A integração entre diferentes abordagens, com a aplicação de métodos de análise distintos e complementares, é um campo de investigação que deve ser ampliado para

produzir modelos analíticos que levem ao entendimento da forma urbana em suas múltiplas dimensões.

É neste contexto específico que o presente artigo está inserido: o interesse em integrar métodos desenvolvidos em duas abordagens analíticas da morfologia urbana. A primeira fundamenta-se na Teoria da Lógica Social do Espaço, também conhecida como Teoria da Sintaxe Espacial desenvolvida por Bill Hillier e Julienne Hanson (1984). A segunda, na Teoria dos Fractais proposta por Benoit Mandelbrot (1967, 1982), cujos princípios aplicados para a análise de cidades foram sintetizados em 1994, no livro *Fractal Cities*, de autoria de Michael Batty e Paul Longley. Ambas

apresentam natureza quantitativa e envolvem a aplicação de métodos que buscam descrever a forma urbana a partir da mensuração de suas propriedades geométricas e das suas relações espaciais. Dentre estes métodos, são de interesse os procedimentos descritivos que fazem uso de medidas configuracionais (Hillier e Hanson, 1984) e aqueles baseados em medidas fractais para a análise de textura de imagens digitais, particularmente aqueles que observam os padrões de lacunaridade (Gefen *et al.*, 1984). Suas principais características são descritas a seguir.

A análise de textura de imagens de satélite de favelas e não-favelas de cidades de vários continentes demonstrou, por meio de medidas de lacunaridade, uma correlação consistente entre os padrões sociais e espaciais, refletindo a dimensão e o aspecto material dos constituintes da forma urbana – edificação, rua, bloco, praça – bem como elementos naturais – rio, mar, vegetação, etc. (Barros Filho e Sobreira, 2005; Kit *et al.*, 2011; Owen, 2012). A relevância e a consistência desses achados levantam a questão se tais propriedades estariam subjacentes a mapas temáticos que descrevem propriedades urbanas diversas, notadamente aquelas relacionadas às propriedades configuracionais que descrevem assimetrias estruturais. Em outras palavras, se os aspectos relacionados à ordem (imagem do satélite) e à estrutura (propriedades configuracionais) dos elementos constituintes da forma urbana estariam de algum modo relacionados pela distribuição interna dos padrões de lacunas, conforme descrito pelos valores de lacunaridade.

Análise de textura de imagens digitais

A análise de textura de imagens digitais tem por objetivo reconhecer e distinguir arranjos espaciais com base em métodos que medem a variabilidade dos valores de nível de cinza de seus pixels. Quanto maior a variabilidade, menor será a homogeneidade ou uniformidade da textura da imagem (Barros Filho e Sobreira, 2005).

Um padrão de textura é sempre dependente de fatores de escala. Pode variar

significativamente de acordo com o tamanho e a resolução espacial de uma imagem digital. Uma imagem muito pequena, por exemplo, pode conter parte de um padrão e, portanto, pode não ser capaz de caracterizá-lo, enquanto uma imagem grande pode ser composta por mais de um padrão singular e também não conseguir descrevê-los adequadamente. De forma semelhante, um pixel em uma imagem de baixa resolução espacial pode representar um sinal integrado de padrões ainda menores do que o tamanho do pixel. À medida que a resolução espacial aumenta, os pixels da imagem podem se tornar menores do que o padrão analisado, gerando ruídos espectrais que degradam a classificação da imagem (Mesev, 2003).

Não existe, portanto, uma escala única ou preferível para caracterizar um padrão de textura. Sua escala real depende de suas escalas de observação e de mensuração. Para Mandelbrot (1967), o comprimento de uma linha costeira em um mapa depende do instrumento utilizado na sua medição. Se a linha for medida com uma régua grande, muitos detalhes não serão computados. Se a mesma linha for medida com uma régua menor, maior será a quantidade de medições e maior será o seu comprimento (Figura 1). Com base nesta relação é possível generalizar que fenômenos espaciais estão regidos por uma lei de escala: quanto maior o seu tamanho, menor será a sua quantidade. Matematicamente, esta relação pode ser representada em um gráfico logarítmico do tamanho pela quantidade. A declividade da linha de regressão deste gráfico corresponde à dimensão fractal e expressa o grau de irregularidade ou o grau de eficiência do padrão na ocupação de um espaço (Mandelbrot, 1982).

A dimensão fractal está baseada na hipótese de que padrões espaciais são auto-similares, ou seja, se repetem em diversas escalas e quando são analisados simultaneamente em diferentes escalas exibem certa dependência hierárquica, que fornece informações úteis na sua caracterização (Figura 2). Diversas análises de textura em imagens têm sido realizadas com o intuito de diferenciar classes de usos do solo utilizando valores de dimensão fractal (Burrough, 1983; De Cola, 1989; Lam, 1990). A dimensão fractal, entretanto,

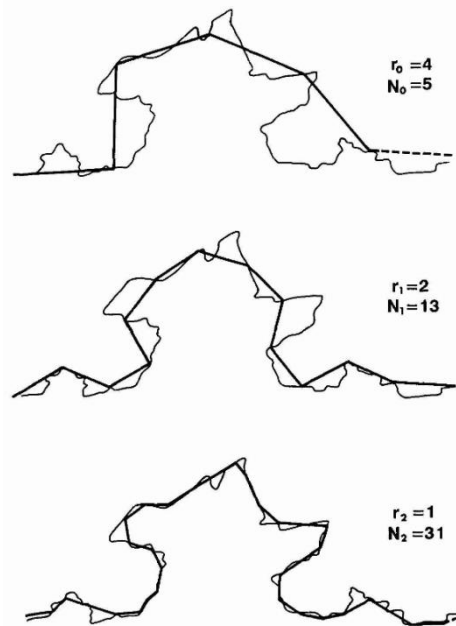


Figura 1. Número n de segmentos gerados ao medir o comprimento de um perímetro irregular com três diferentes tamanhos de réguas: r_0 , r_1 e r_2 (fonte: Batty e Longley, 1984).

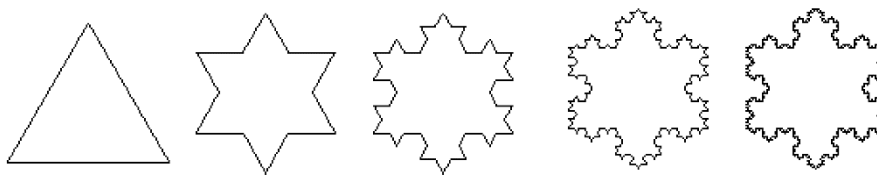


Figura 2. Diferentes etapas do fractal conhecido como Flocos de Neve de Koch.

não oferece uma completa descrição de padrões urbanos, porque tais padrões não são exatamente auto-similares e podem apresentar as mesmas dimensões fractais, mas diferentes texturas (Mandelbrot, 1982; Lin e Yang, 1986).

Uma das maneiras de superar tais dificuldades é a análise de padrões de lacunaridade. A lacunaridade pode ser definida como uma medida complementar da dimensão fractal ou o desvio de uma estrutura geométrica de sua invariância translacional (Gefen *et al.*, 1984). Permite distinguir padrões espaciais por meio da análise de distribuição de lacunas, entendidas como pixels com valores específicos em diferentes escalas (Plotnick *et al.*, 1996). Valores altos de lacunaridade

revelam grande variabilidade de lacunas em uma imagem e, portanto, maior heterogeneidade na sua textura. A lacunaridade é uma poderosa ferramenta de análise de textura de espaços urbanos registrados por imagens de satélite, pois é uma medida multi-escalar, isto é, permite uma análise de densidade, compactação ou dispersão através de escalas.

Existem diversos algoritmos para calcular a lacunaridade de uma imagem. Entre eles, dois algoritmos são comumente utilizados: 'caixas deslizantes' e 'caixas diferenciais'. O algoritmo de caixas deslizantes (Allain e Cloitre, 1991) considera uma caixa de tamanho r a deslizar sobre uma imagem e essa caixa aumenta progressivamente após cada rodada (Figura 3).

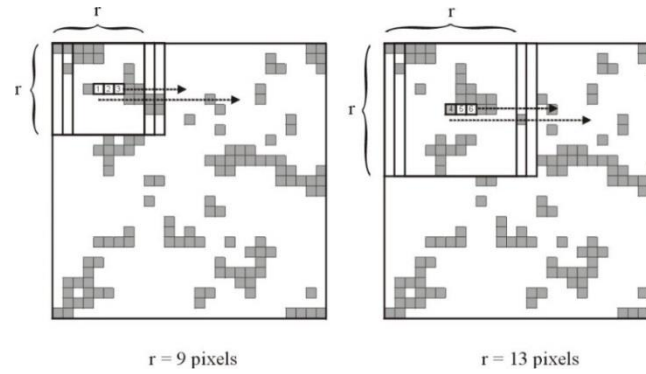


Figura 3. Exemplo do algoritmo de caixas deslizantes em dois tamanhos r de caixa: 9 e 13 píxéis (fonte: Barros Filho e Sobreira, 2007).

O número de caixas deslizantes com raio r e massa M é definido como $n(M, r)$. A distribuição de probabilidade $Q(M, r)$ é obtida dividindo $n(M, r)$ pelo número total de caixas. A lacunaridade na escala r é definida como o desvio do quadrado médio da variação da probabilidade de distribuição de massa $Q(M, r)$ dividido pelo seu meio quadrado.

$$L(r) = \frac{\sum_M M^2 Q(M, r)}{\left[\sum_M M Q(M, r) \right]^2} \quad (1)$$

onde $L(r)$ = lacunaridade de tamanho de caixa r

M = massa ou píxéis de interesse

$Q(M, r)$ = probabilidade de M em tamanho de caixa r

O algoritmo de caixas deslizantes é aplicado a imagens binárias com apenas 1 bit. Para superar essa limitação, o algoritmo de Caixas Diferenciais foi proposto por Dong (2000) para calcular a lacunaridade de imagens com 2 ou mais bits, ou seja, imagens cujos píxéis podem ter muitos tons de cinza. Por exemplo, em uma imagem de 8 bits cada pixel pode ter 2^8 tons de cinza. Neste caso, ele mede a intensidade média dos píxéis por caixa, que é a diferença entre os valores de intensidade máxima e mínima em cada caixa de tamanho r (Karperien, 2007).

De acordo com este algoritmo, uma caixa deslizante de tamanho r é colocada no canto superior de uma janela de imagem de

tamanho $W \times W$. O tamanho de janela W deve ser um número ímpar para permitir que o valor calculado seja atribuído a um pixel central, sendo $r < W$. Dependendo dos valores de pixel dentro da caixa deslizante $r \times r$, uma coluna com mais de um cubo pode ser necessária para cobrir o valor máximo de pixel por meio do empilhamento de caixas de cubo umas sobre as outras, se o pixel mínimo e máximo dos valores dentro de uma dada coluna caírem na caixa cúbica u e v , respectivamente. Então, a altura relativa da coluna será (Myint *et al.*, 2006):

$$n_r(i, j) = v - u + 1 \quad (2)$$

onde $n_r(i, j)$ = altura relativa da coluna em i e j

V = caixa cúbica com valor máximo de píxéis

U = caixa cúbica com valor mínimo de píxéis

Quando a caixa deslizante desliza sobre a janela da imagem $W \times W$, a massa será:

$$M_r = \sum_{i,j} n_r(i, j) \quad (3)$$

onde M_r = massa da imagem em tons de cinza

$n_r(i, j)$ = altura relativa da coluna em i e j

Então, a massa M na equação 2 é substituída por M_r na equação 3 para obter a lacunaridade na janela $W \times W$. O valor de lacunaridade é atribuído ao pixel central da janela, à medida que a janela $W \times W$ desliza em toda a imagem (Figura 4).

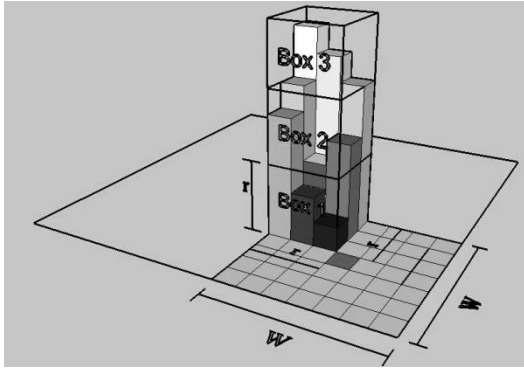


Figura 4. Exemplo do algoritmo de caixas deslizantes (fonte: Barros Filho e Sobreira, 2008).

Sintaxe Espacial

A Teoria da Sintaxe Espacial (Hillier e Hanson, 1984) tem sua origem no campo da morfologia da arquitetura (Steadman, 1983) na década de 1970. Tem por interesse entender a relação descrita a partir de suas propriedades configuracionais, observada segundo formas de uso e ocupação em dois tipos de espaços: os abertos e contínuos – os espaços urbanos; e os fechados e descontínuos – as edificações. Seu argumento central sugere que a estrutura espacial subjacente a qualquer edifício ou cidade não é simplesmente um cenário para a vida social, mas sim seu componente integral.

Para descrever e compreender em que medida espaço e sociedade estão associados, três dimensões espaciais são consideradas: a) as linhas axiais, relacionadas ao movimento; b) os espaços convexos, relacionados ao uso e ocupação; e c) os campos visuais. O conjunto de unidades convexas e axiais constitui mapas que permitem sua descrição como sistemas topológicos, onde as respectivas unidades são representadas como nós em um grafo e a conexão entre elas, como arestas. A partir dos grafos, é possível inferir um conjunto de medidas. De maior relevância é o valor de integração, uma medida de centralidade que descreve a profundidade média de cada unidade espacial (axial ou convexa) para todas as demais. Ou seja, descreve em que medida determinadas porções de espaço são mais rasas – portanto de mais fácil acesso de todo e qualquer

espaço constituinte do sistema considerado – ou mais profundas. Estudos empíricos demonstram que espaços mais rasos tendem a concentrar maior movimento de usuários, bem como de atividades de destinação coletiva (Hillier, 1996) – Figura 5.

A propriedade de integração expressa a profundidade média de cada espaço, considerando todos os demais, e está associada à noção de assimetria distintiva das condições de acesso entre espaços. A relação entre assimetria e profundidade é descrita pela chamada relativa assimetria (RA), razão entre a profundidade do sistema espacial com seu grau de profundidade teórico (Hillier e Hanson, 1984), segundo a equação:

$$RA = \frac{2(MD-1)}{k} - 2 \quad \{4\}$$

onde

k = o número de espaços do sistema;

MD = a profundidade média do sistema, obtida pela razão entre a soma da profundidade de cada espaço para os demais – o número de espaços atravessados na passagem de um a outro, e o número de espaços menos 1 (o espaço original).

A profundidade média é obtida por meio da razão:

$$MD = \frac{\sum d}{k-1} \quad \{5\}$$

onde d é a profundidade de cada espaço em relação a cada um dos elementos constituintes do sistema

A medida de RA, porém, não permite a comparação entre sistemas de tamanhos distintos, pois, quanto maior o sistema for, menos é a probabilidade de conexão entre as unidades espaciais que o constituem. Faz-se necessário introduzir um procedimento de normalização da medida, relacionando-a ao valor que expressa a relativa assimetria de sistema espacial, cuja estrutura topológica tem uma forma de diamante, de valor D (Hillier e Hanson, 1984). Desta forma:

$$RRA = \frac{RA}{D} \quad \{6\}$$

onde,

RRA = relativa assimetria real do sistema, e
D = valor teórico da relativa assimetria de sistema de mesmo número de espaços.

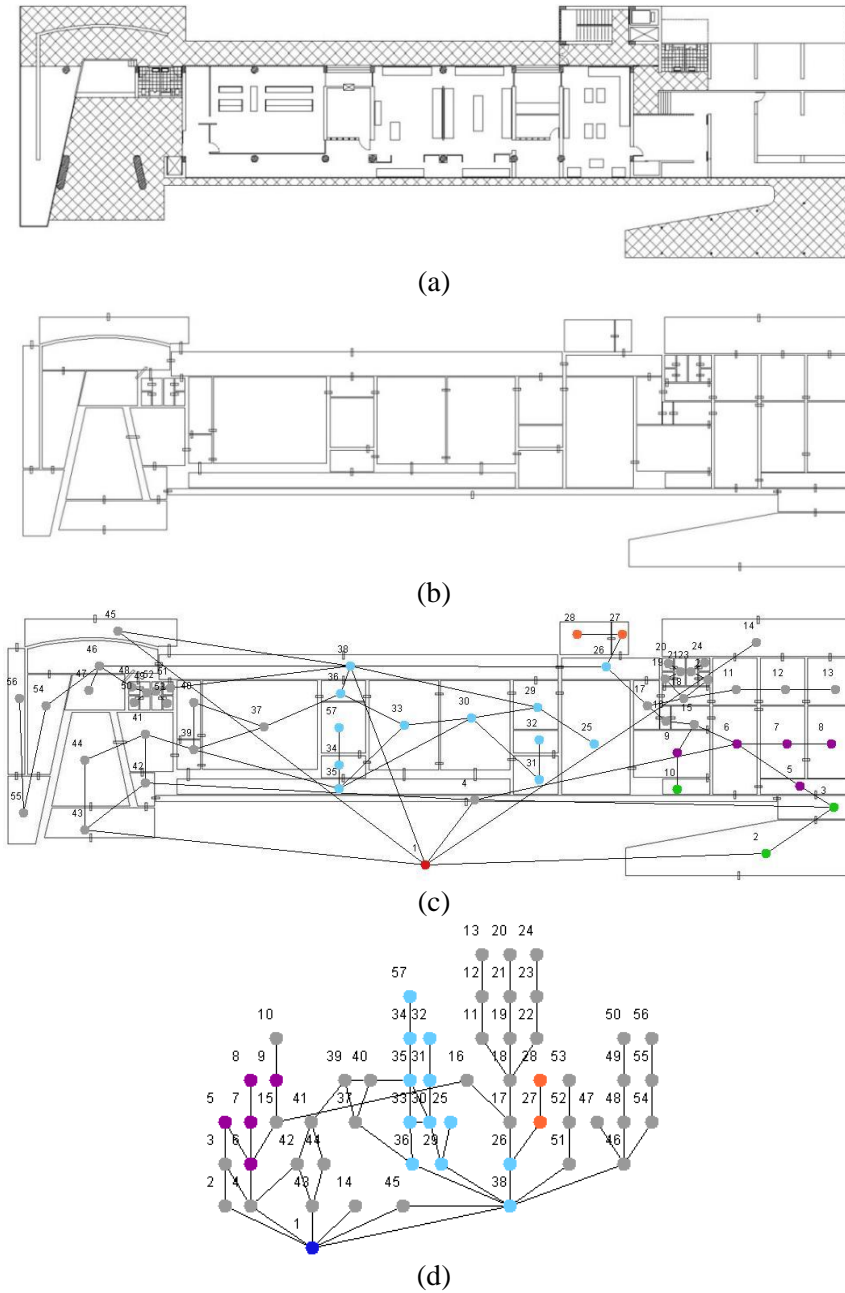
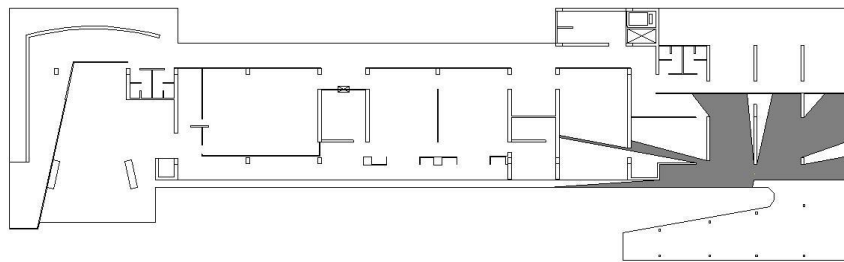


Figura 5. Representação espacial, segundo a sintaxe espacial: (a) planta-baixa; (b) mapa convexo; (c) mapa de permeabilidade; (d) grafo justificado (fonte: Amorim *et al.*, 2009).

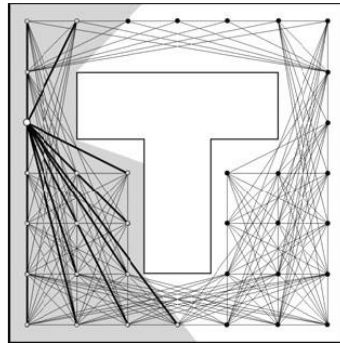
O valor de integração é obtido pelo inverso de valor de relativa assimetria real (1/RRA). Esta transformação vem sendo utilizada para permitir a associação entre valores mais altos a espaços centrais e integrados e valores baixos a espaços mais segregados.

A descrição dos campos visuais foi introduzida nos estudos do ambiente construído por Michael Benedickt (1979), no

clássico artigo *To take hold of space: isovists and isovist fields*. Define por *isovist*, ou isovista, a área visível de determinada posição no espaço, representada por um polígono delimitado por barreiras à visão – superfícies opacas e translúcidas – e linhas de oclusão geradas pelas barreiras (Figura 6) e, como tal, pode ser descrita segundo suas propriedades geométricas, como área, perímetro, compacidade (relação área x



(a)



(b)

Figura 6. Campos visuais: (a) Isovista (Amorim *et al.*, 2009); (b) VGA (fonte: Turner, 2001).

perímetro), etc.

Alasdair Turner (2000 / 2007, 2001), interessado em associar os procedimentos de análise configuracional já consolidados no contexto da sintaxe espacial àqueles desenvolvidos por Benedikt (1979), propôs um sistema de representação que descreve os campos visuais como um sistema relacional, conhecido como *Visual Graph Analysis* (VGA). O procedimento toma por princípio a definição de uma malha regular de posições no espaço, a partir das quais obtêm-se informações acerca do ambiente circundante. Neste procedimento, o interesse prioritário repousa na relação visual entre pontos no espaço representado como um grafo. Neste modelo, as barreiras e as linhas de oclusão são as responsáveis pela introdução de assimetrias visuais, como nas condições de permeabilidade descritas nos modelos convexo e axial (Figura 6).

A relação visual entre os diferentes pontos constituintes da malha pode ser descrita segundo as medidas correntemente utilizadas na análise sintática. Os valores obtidos são representados em forma de

malha contínua segundo uma escala de tons de cinza, variando de valores escuros – baixos – a valores claros – altos (ver figuras 8 e 9) – ou escala cromática – cores quentes representam valores mais altos e cores frias, mais baixos. Duas variáveis são de interesse: a conectividade visual e a integração visual. A primeira é função do número de pontos constituintes da malha visíveis de cada um deles e revela a dimensão dos campos visuais – quando maior o número de conexões, maior a área da isovista. A segunda é obtida por meio do mesmo procedimento descrito, com a distinção de levar em consideração a malha de posições no espaço como sistema topológico.

Seleção de fragmentos urbanos e definição de procedimentos analíticos

O estudo comparativo tomou as imagens de quatro fragmentos urbanos do Recife, Brasil. Seus limites foram definidos para representar importantes processos de construção da cidade e apresentarem distintas estruturas

formais, diversidade em termos de uso do solo, classes sociais e dinâmica urbana. Suas posições relativas procuraram capturar as características predominantes de cada área selecionada. Foram selecionados a partir de uma imagem de satélite *Quickbird*, com uma resolução espacial de 0.70 m, tomada em 2001, o que significa que cada pixel corresponde a 0.70 x 0.70 m. Adotou-se a imagem datada de 2001 por ser compatível com a base cartográfica municipal das áreas de estudos. Portanto, cada fragmento de 500.00 x 500.00 m corresponde a 712 x 712 pixels. Os fragmentos urbanos são mostrados, lado a lado, na Figura 7, e a Tabela 1 apresenta as coordenadas 'Universal Transversa de Mercator' (UTM) de cada fragmento selecionado.

Os quatro fragmentos urbanos foram objeto de estudos anteriores, descritos de acordo com suas propriedades de lacunaridade (Barros Filho e Amorim, 2008, 2015) e comparadas às imagens de mapas de distribuição da interface público-privada e suas variáveis sociais e econômicas (Amorim *et al.*, 2014). Os resultados obtidos com a análise da textura de imagens dos mapas de constituição (interface entre espaços públicos e privados) não apenas estão correlacionados positivamente com as imagens de satélite, como também revelaram padrões associados às condições sociais da população residente e à dinâmica urbana local, definidos, principalmente, pela forma urbana, dimensão dos elementos urbanos e de uso do solo. Tais resultados vieram confirmar que padrões morfológicos e sócio-espaciais estão associados, como demonstrado (Barros Filho, 2007; Barros Filho e Amorim, 2008; Barros Filho e Sobreira, 2005, 2007).

Deve-se salientar que o procedimento adotado pelos autores para analisar a textura de imagens de mapas temáticos contendo informações urbanas de segunda ordem, particularmente associadas à sua forma, como mapas axiais, convexos, de segmentos, de constituição e VGA, vêm sendo aplicados por outros pesquisadores, o que demonstra seu potencial. Por exemplo, Ariza-Villaverde *et al.* (2013) associaram procedimento de identificação do valor de lacunaridade de mapas axiais de dois bairros de Córdoba, Espanha.

Os mesmos fragmentos são utilizados no presente estudo com o interesse de comparar seus resultados àqueles já obtidos em estudos anteriores (Barros Filho e Amorim, 2008, 2015; Amorim *et al.*, 2014) e definir um conjunto de procedimentos analíticos de leitura e análise de imagens de áreas urbanas fruto de diferentes fontes, sejam elas de primeira ordem, como imagens de satélite, ou de segunda ordem, que representam resultados de análises urbanas.

Os fragmentos urbanos

O fragmento relativo ao Bairro de São José foi selecionado por fazer parte do núcleo histórico do Recife – a Ilha de Antônio Vaz, cuja ocupação inicial, em sua parte Norte, remonta ao último quartel do século XVI. Mapas do início do século XVII revelam ocupações incipientes ao Sul, onde se localiza a área selecionada. O sítio pode ser descrito como uma malha deformada (Hillier e Hanson, 1984), composta por quadras de forma irregular e de grandes dimensões, ruas estreitas e sinuosas, interrompidas por praças e adros (Loureiro e Amorim, 2000).

Os dados históricos confirmam que o bairro era densamente habitado até o primeiro quartel do século XX, quando uma forte atividade econômica associada ao comércio de varejo de importância regional se consolida e vem, lentamente, promover a mudança de uso e a transferência da população residente para outros bairros. O sítio permaneceu praticamente íntegro até a década de 1970, quando foi, finalmente, o plano de reformas urbana concebido e desenvolvido entre as décadas de 1920 e 1930 (Pontual, 2001), responsável por profundas transformações urbanas, com a demolição de uma parte considerável do sítio histórico.

O segundo fragmento representa os típicos assentamentos auto-gerados encontrados em diversas áreas da cidade, como de resto, em um grande número de cidades latino-americanas, seja nas proximidades dos seus centros históricos, seja nas suas periferias. O Bairro de Brasília Teimosa tem origem na década de 1950 e é fruto de aterros sucessivos, responsáveis pela

Tabela 1. Coordenadas dos fragmentos selecionados

Fragmento	Coordenada inferior esquerda	Coordenada superior direita
Boa Viagem	290750, 9102000	291250, 9102500
Brasília Teimosa	292500, 9105600	293000, 9106100
IPSEP	288.250, 9102250	288750, 9102750
São José	292750, 9107500	293250, 9108000



a) São José



b) Brasília Teimosa



c) IPSEP



d) Boa Viagem

Figura 7. Fragmentos urbanos do Recife: imagem de 8 bits, 712 x 712 pixels.

ampliação contínua de terra firme nas décadas subsequentes. Caracteriza-se pela composição de uma malha urbana densa e deformada no local original da sua formação e de malha regular composta por quadras longas e estreitas, resultante de um programa público de urbanização e de oferta de habitação social. Esta talvez seja a principal característica do fragmento: todos os seus elementos urbanos são de pequena dimensão – ruas estreitas, parcelas e edifícios

pequenos.

A origem do terceiro fragmento urbano, o bairro de Boa Viagem, está associada a uma vila de pescadores surgida ainda no século XVIII, que, mais tarde, tornou-se um importante destino de férias de verão da burguesia local. O tecido urbano, resultado de processos de urbanização pública e privada, é definido por malha regular composta por quadras de diferentes dimensões e disposição. É, hoje em dia, o

bairro mais populoso e denso do Recife e residência das famílias de mais alta renda da sociedade local.

O bairro do Instituto de Previdência dos Servidores do Estado de Pernambuco (IPSEP) é resultado de programa oferta de habitação subsidiada destinada aos funcionários públicos estaduais, idealizado e projetado pelo antigo instituto de habitação do Estado de Pernambuco. Sua concepção, do início dos anos de 1950, é devedora do urbanismo moderno associado aos princípios e recomendações formulados pelos *Congrès Internationaux d'Architecture Moderne* (CIAM). Construído em etapas sucessivas, expressas nas diferentes expressões arquitetônicas das unidades habitacionais, individuais ou coletivas, o conjunto apresenta hoje mudanças substanciais introduzidas por seus habitantes ao longo dos anos, tanto na esfera pública (privatização de espaços abertos públicos), quanto privada (ampliação das habitações), fenômeno recorrente em diversos conjuntos habitacionais brasileiros (Amorim e Loureiro, 2009; Rigatti, 2000).

Procedimentos metodológicos

A Análise Gráfica Visual (VGA) foi desenvolvida a partir de mapa georreferenciado elaborado pela municipalidade, devidamente simplificado para representar unicamente os elementos urbanos responsáveis por obstruir o movimento e os campos visuais nos espaços urbanos. A dimensão da malha foi definida para permitir uma compatibilidade com o tamanho do pixel da imagem de satélite e, conseqüentemente, permitir a comparação dos resultados obtidos. Cuidado foi tomado para garantir que a malha preenchesse todos os espaços dos fragmentos urbanos selecionados, em particular os becos estreitos e tortuosos encontrados em Brasília Teimosa. A malha adotada foi de 2.80 x 2.80m.

As imagens resultantes (figuras 8 e 9) são caracterizadas por uma tesselação em tons de cinza sobre um fundo preto que representa as quadras e as edificações existentes. O arquivo gerado, originalmente vetorial, foi transformado em um arquivo *tiff*, base para a

análise de textura. Este processo altera a estrutura da malha, para ser constituída por unidades de pixéis de 1.14 m. Isso é cerca de 1.62 vezes maior do que o tamanho de pixel da imagem de satélite, como será visto na Tabela 2.

Para permitir uma análise comparativa entre as imagens de satélite e VGA, foi necessário considerar que o número de pixéis em cada imagem é diferente. Para proceder à análise de lacunaridade, utilizou-se o algoritmo de contagem de caixa diferencial aplicado às imagens VGA de escala de cinza, com fundo preto. Foram definidos sete tamanhos de caixa (2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128) e o tamanho mínimo da caixa corresponde a 1 pixel e o máximo corresponde a 45% do tamanho da imagem. As caixas deslizam em cada pixel nos eixos horizontal e vertical. Para as imagens de satélite, o tamanho da caixa mínima foi alterado para 2 pixéis e a caixa deslizando a cada 2 pixéis. Essas alterações permitiram que o número de pixéis de cada imagem considerada na análise de lacunaridade fosse próximo um do outro.

Finalmente, os valores de lacunaridade de cada imagem foram correlacionados em relação a cada tamanho de caixa, e uma curva foi gerada, mostrando o comportamento de lacunaridade da imagem ao longo das escalas espaciais selecionadas. Também foi considerada a média dos valores de lacunaridade (L_m) em todos os tamanhos de caixa para permitir uma comparação direta entre as imagens (Tabela 3).

Resultados de dados VGA

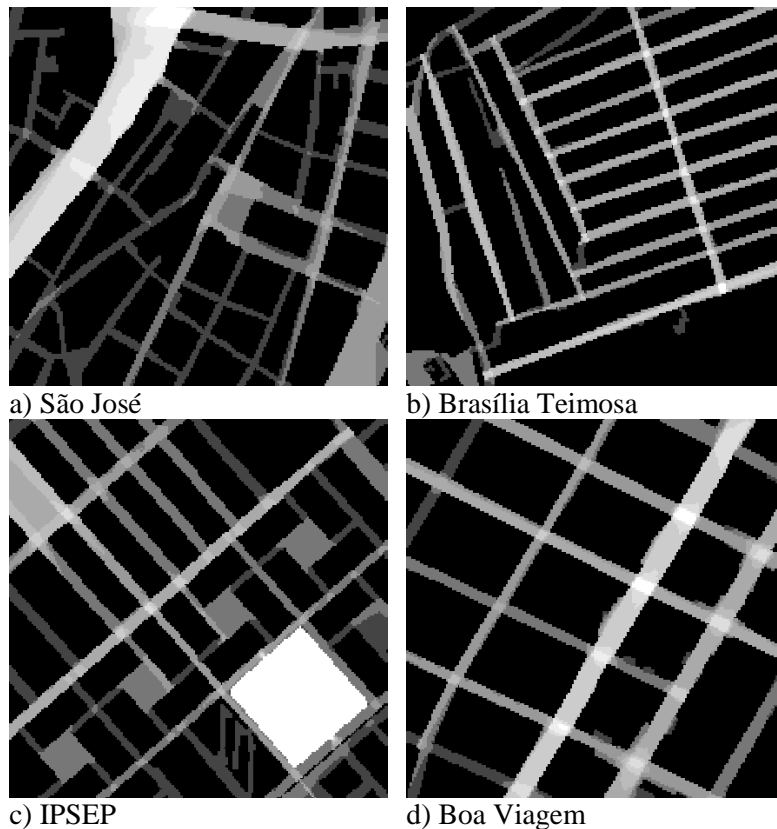
As malhas urbanas mais regulares, como Boa Viagem, partes de Brasília Teimosa e do IPSEP, como esperado, destacam os pontos da malha situados nos cruzamentos entre as ruas como sendo os mais conectados e integrados visualmente, onde os campos visuais estendem-se em diferentes direções (ver figuras 8 e 9). A distinção entre os diferentes cruzamentos nos fragmentos analisados é função do tamanho dos espaços abertos – quanto mais larga a rua ou avenida, ou quanto maior a praça, maiores são os valores obtidos.

Tabela 2. Síntese das características das imagens analisadas.

Imagem	Dimensão da imagem	Dimensão do pixel	Bits
Satélite	712x712	0.70	8
VGA	436x436	1.14	8

Tabela 3. Síntese dos parâmetros adotados.

Algoritmo	<i>Differential Box Counting</i>
Tipo de imagem	Escala de cinza (8 bits)
Cor de fundo	Preto
Tamanho mínimo de caixa	1 pixel para imagem VGA 2 pixéis para imagem de satélite
Tamanho máximo de caixa	45% do tamanho da imagem
N.º de pixéis por caixa deslizante (X)	1 pixel para imagem VGA 2 pixéis para imagem de satélite
N.º de pixéis por caixa deslizante (Y)	1 pixel para imagem VGA 2 pixéis para imagem de satélite
Tamanho das caixas	2x2, 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, 64x64, 128x128 pixeis

**Figura 8. Conectividade visual: tons de cinza mais claros correspondem aos pontos mais conectados.**

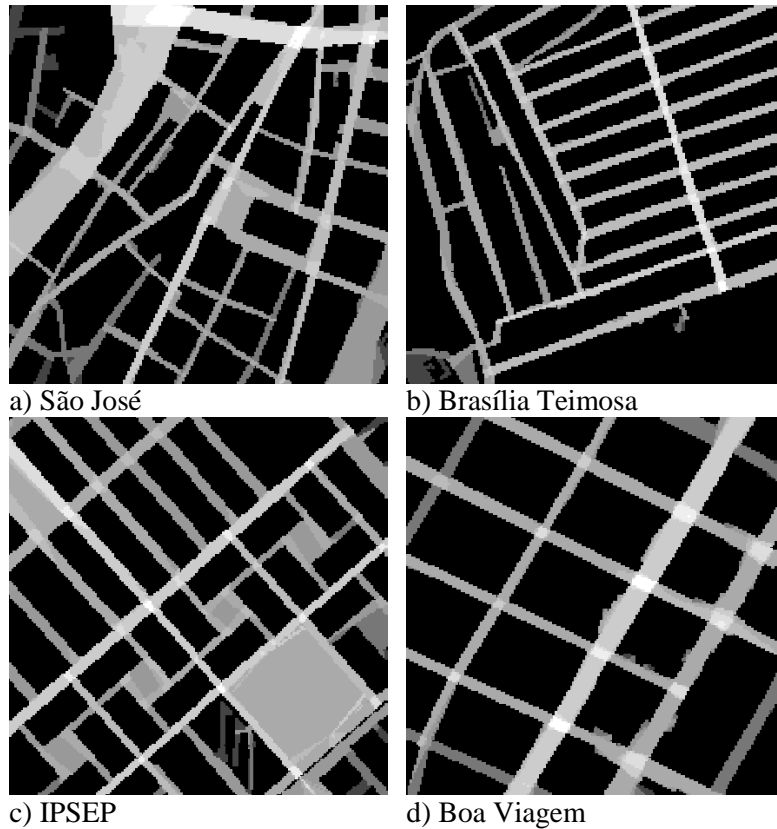


Figura 9. Integração visual: tons de cinza mais claros correspondem aos pontos mais integrados.

É importante ressaltar que algumas áreas estão altamente conectadas localmente, mas mal integradas, como é visto nos campos de futebol no fragmento do IPSEP. Isto ocorre porque a área, apesar da dimensão, está dissociada das demais áreas do sistema, diferentemente do Pátio do Carmo, no fragmento de São José, que está altamente conectado e integrado às áreas urbanas adjacentes e circundantes.

Os valores médios obtidos são relevantes (ver Tabela 4). O fragmento de Boa Viagem apresenta o maior valor, devido à estrutura da malha urbana e ao tamanho de suas avenidas e ruas. Brasília Teimosa, por outro lado, é a mais baixa, como consequência da estreiteza dos espaços urbanos e da falta de conectividade visual entre partes constituintes da malha. Tal condição também é observada no fragmento do IPSEP, onde a interrupção constante da malha estabelece uma hierarquia entre as praças residenciais de caráter local e as ruas mais integradas. Já no fragmento de São José ocorre o oposto,

onde pátios e praças constituem polaridades urbanas, enquanto as ruas estreitas estão situadas na parte mais isolada do sistema visual global.

A distinção dos fragmentos também é descrita pela propriedade da inteligibilidade visual, função da correlação entre valores de conectividade e de integração visual, expressos numericamente pelo valor de r^2 da linha de regressão. A inteligibilidade revela, de acordo com Hillier (1996), em que medida é possível inferir localmente aspectos globais da forma urbana. Portanto, quanto mais inteligível for um sistema espacial, mais fácil será a navegação em seu interior.

O fragmento relativo ao Bairro de Boa Viagem é o mais visualmente inteligível, uma vez que a estrutura em forma de malha regular facilita a apreensão visual do todo, enquanto o fragmento do Bairro do IPSEP é o menos inteligível, como resultado de sua configuração de ruas interrompidas e praças isoladas.

Tabela 4. Dados VGA.

Fragmento	Conectividade (média)	Integração (média)	Inteligibilidade
Boa Viagem	1167,32	8,13	0.85
IPSEP	851.38	5.00	0,39
São José	1045.58	4.97	0.45
Brasília Teimosa	328.90	4.23	0.43

Análise de lacunaridade em imagens de satélite

Os resultados da análise de textura das imagens estão relacionados à disposição espacial dos tons de cinza dos pixels nos respectivos fragmentos (Figura 10). Quanto mais concentrados os pixels com um mesmo tom em uma imagem, maior será a lacunaridade. Quanto mais dispersos os valores de escala de cinza estiverem, menor será sua lacunaridade.

Os resultados mostram que o fragmento relativo ao Bairro de Boa Viagem apresenta valores de lacunaridade superiores aos fragmentos remanescentes em quase todas as escalas de análise, isto é, nos distintos tamanhos de caixa, mas as diferenças são mais relevantes entre as caixas menores. Por outro lado, o fragmento correspondente ao bairro de Brasília Teimosa apresenta valores predominantemente mais baixos, particularmente em caixas maiores. Já os fragmentos de São José e IPSEP apresentam valores intermediários e similares, mas os de São José são, em geral, ligeiramente superiores.

O valor de lacunaridade média (Lm) de Boa Viagem sugere que seus elementos morfológicos representados nas imagens de satélite, como edifícios, lotes, quadras, ruas, praças, etc., são maiores do que aqueles que compõem os demais fragmentos urbanos selecionados. Os materiais de construção dos telhados, ruas e avenidas são mais homogêneos ou apresentam dimensões maiores que em outros lugares. No caso de Brasília Teimosa, a presença de um grande número de pequenos espaços ou superfícies espalham os diversos tons de cinza, gerando, comparativamente, valores de Lm inferiores.

O gráfico da Figura 11 que sintetiza o valor médio da lacunaridade (Lm) dos

fragmentos referidos, obtidos nos sete tamanhos de caixa considerados, revela esta ordem hierárquica: Boa Viagem > São José > IPSEP > Brasília Teimosa.

Em suma, pode-se dizer que as imagens de Brasília Teimosa e Boa Viagem são mais homogêneas do que IPSEP e São José. Apesar da sua homogeneidade, o tamanho dos elementos morfológicos é bastante diferente. Mesmo que as imagens estejam na mesma escala, parece que elas são vistas através de diferentes escalas: Boa Viagem em uma escala mais fina que Brasília Teimosa.

Análise de lacunaridade em imagens VGA

É interessante observar que os valores de lacunaridade obtidos com as medidas sintáticas estão positivamente correlacionados, expressando a influência da malha urbana na definição de padrões de visibilidade, como destacado acima. As figuras 12 e 13 revelam que os espaços visualmente mais integrados e conectados estão mais concentrados em Boa Viagem, do que os espaços com propriedades semelhantes observados nos demais fragmentos analisados. A estrutura da malha regular de Boa Viagem contribui para a distribuição regular de tons de cinza na imagem. Em Brasília Teimosa, no entanto, o padrão é oposto, pois os tons de cinza estão mais dispersos ou espacialmente mais bem distribuídos.

O gráfico resultante dos resultados da análise de lacunaridade do mapa de integração visual mostra que Boa Viagem difere dos fragmentos remanescentes, que são próximos uns dos outros, reproduzindo, como seria de esperar, os valores médios de integração visual (ver Tabela 4). Nos mapas

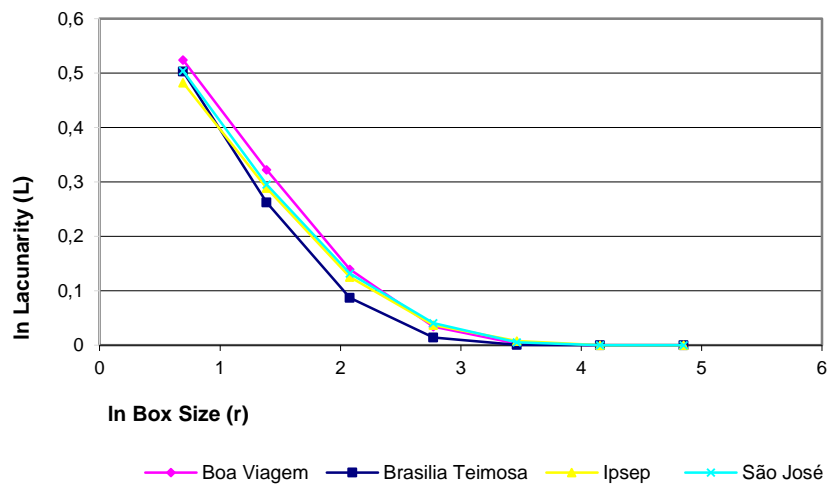


Figura 10. Lacunaridade das imagens de satélite.

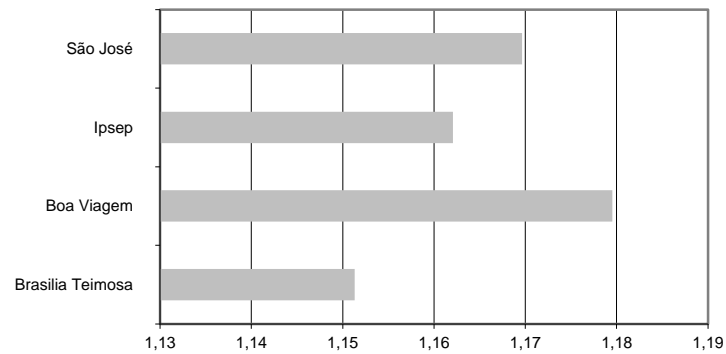


Figura 11. Valores médios de lacunaridade (L_m).

de conectividade visual, no entanto, o fragmento de São José altera seu padrão de comportamento, aumentando significativamente seus valores de lacunaridade, distinguindo-se dos fragmentos de IPSEP e Brasília Teimosa.

Apesar dessas variações, a hierarquia entre os valores de L_m dos fragmentos permanece exatamente a mesma observada nas imagens de satélite: Boa Viagem > São José > IPSEP > Brasília Teimosa (Figura 13).

Conclusões

Dois resultados obtidos são relevantes. Primeiro, os mapas VGA dos fragmentos urbanos apresentam valores de lacunaridade consistentemente correlacionados. Em outras

palavras, a hierarquia de L_m é a mesma: Boa Viagem > São José > IPSEP > Brasília Teimosa. Em segundo lugar, os valores de lacunaridade para as imagens dos mapas VGA de integração e conectividade visual apresentam uma forte correlação com as imagens de satélite.

A análise comparativa das imagens que representam cada fragmento – imagem de satélite e mapas de VGA – revelam uma distinção consistente: os mapas que representam o fragmento relativo ao bairro de Boa Viagem apresentam os valores mais altos, Brasília Teimosa apresenta os valores mais baixos, e as dos bairros do IPSEP e de São José apresentam valores intermediários e similares, sendo São José ligeiramente superior ao IPSEP. Como visto anteriormente, existe um padrão consistente de distribuição de lacunas em ambos os tipos

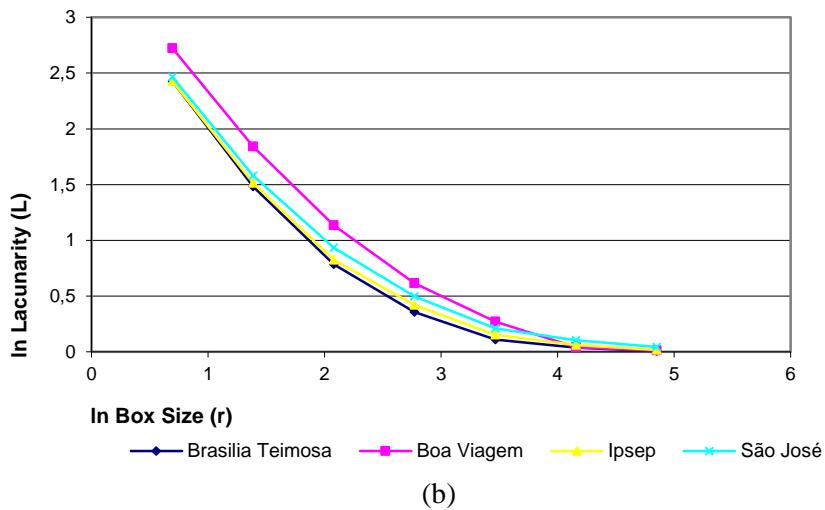
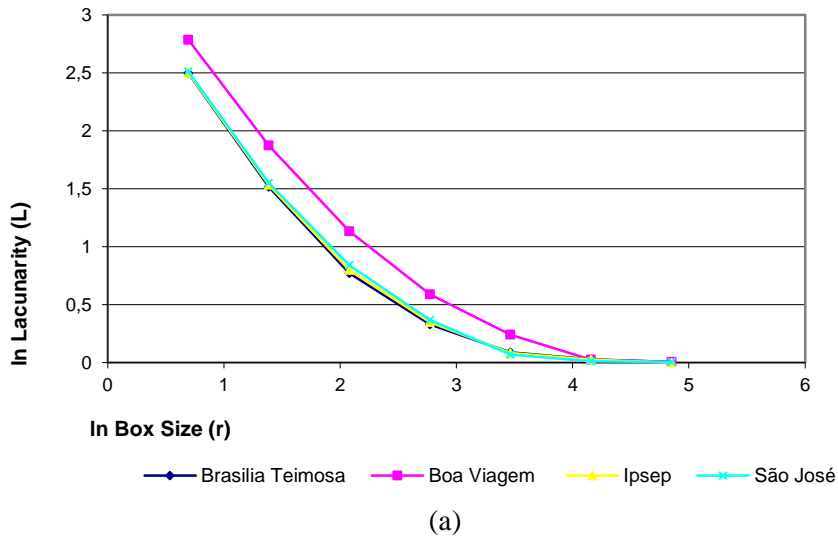


Figura 12. Valores de lacunaridade: (a) integração; (b) conectividade.

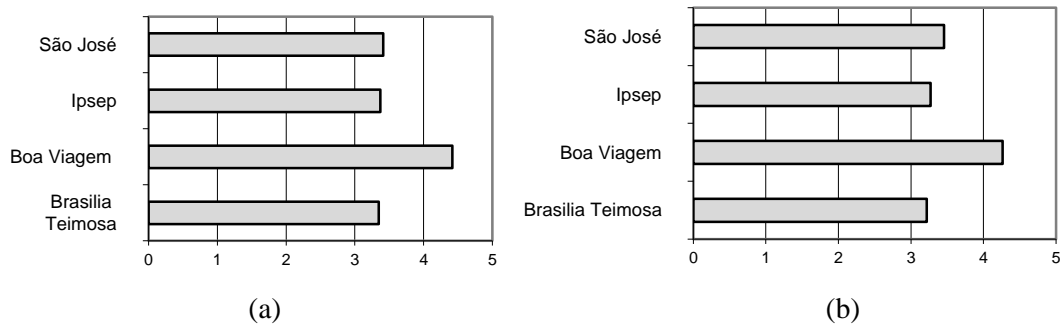


Figure 13. Valores médios de lacunaridade (L_m): (a) integração; (b) conectividade.

de imagem.

Esses resultados demonstram, portanto, que, a partir da combinação de duas abordagens morfológicas distintas e complementares, é possível melhor correlacionar e distinguir padrões espaciais em fragmentos urbanos bastante

heterogêneos entre si. Tais resultados são consistentes com outros estudos que vêm sendo realizados pelos autores e por outros pesquisadores, como o que observa os valores de lacunaridade de mapas axiais de dois bairros de Córdoba, Espanha, realizado por Ariza-Villaverde *et al.* (2013).

Apesar dos resultados promissores, é necessário explorar uma gama mais ampla de variáveis configuracionais para certificar se tais propriedades estruturais da malha urbana também apresentam padrões de textura que se correlacionam positivamente com as imagens de satélite. Além disso, a exploração de outras escalas de tons de cinza para gerar os mapas VGA, observando maior ou menor número de tonalidades, pode levar a resultados mais relevantes, convergentes com as variações de tons encontrados nas imagens de satélite.

É preciso também ressaltar que os valores de L_m das imagens de satélite são mais baixos (entre 1.15 e 1.17) do que os encontrados nas imagens VGA (entre 3.21 e 4.41). A variação dos valores de L_m das imagens de satélite é muito superior àquelas mostradas pelas imagens VGA dos mesmos fragmentos, revelando mais claramente as distinções morfológicas das áreas urbanas selecionadas.

Vale destacar ainda que as áreas foram mapeadas de acordo com as barreiras visuais existentes, no entanto, não considerou que algumas áreas oferecem um certo grau de transparência, estendendo os campos visuais ao interior das propriedades privadas, como por exemplo, quanto à existência de muros baixos ou gradis que permitem a visualização do interior dos lotes. Como consequência, os mapas VGA reproduzem, em certa escala, a geometria dos espaços públicos, que, aliás, parece ser refletida na imagem de satélite, tendo em vista a homogeneidade do material que a reveste – asfalto e concreto armado. Em outras palavras, as ruas, avenidas e largos apresentam padrões de textura relevantes que, combinados com o tamanho dos elementos urbanos, contribuem para aproximar a distribuição da lacunaridade dos mapas de VGA e da imagem de satélite. Futuros estudos tentarão superar essas limitações.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) por apoiarem esta investigação e à Carolina

Brasileiro pela coleta dos dados utilizados neste trabalho.

Referências

- Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J. e Gutiérrez de Ravé, E. (2013) 'Multifractal analysis of axial maps applied to the study of urban morphology', *Computers, Environment and Urban Systems* 38, 1-10.
- Allain, C. e Cloitre, M. (1991) 'Characterizing lacunarity of random and deterministic fractal sets', *Physics Review A* 44, 3552-8.
- Amorim, L. e Loureiro, C. (2009) 'Can fig trees bud roses?' em Lara, F. (ed.) *Global apartments: studies in housing homogeneity* (Studio Toró-University of Michigan/Lulu.com, Ann Arbor) 42-60.
- Amorim, L., Barros Filho, M. e Cruz, D. (2014) 'Urban texture and space configuration: an essay on integrating socio-spatial analytical techniques', *Cities* 39, 58-67.
- Amorim, L., Brasileiro, C. e Ludermir, R. (2009) 'Da conservação do espaço da arquitetura: o Instituto de Antibióticos', *8º Seminário Docomomo Brasil*, Rio de Janeiro, 1 a 5 de Setembro.
- Barros Filho, M. (2007) 'A morfologia da habitabilidade intra-urbana: O uso de imagem CBERS-2 na análise de padrões morfológicos no Recife', *XIII Brazilian symposium of remote sensing*, Florianópolis, 21 a 26 de Abril.
- Barros Filho, M. e Amorim, L. (2008) 'Texturas urbanas e diferenciações morfológicas', *II Brazilian Symposium of Geodesic Sciences and Geoinformation Technologies*, Recife, 8 a 11 de Setembro.
- Barros Filho, M. e Amorim, L. (2015) 'Fragmentos urbanos: procedimento analítico para a identificação de padrões morfológicos a partir de texturas de imagens de satélite', *RBC – Revista Brasileira de Cartografia* 67, 655-68.
- Barros Filho, M. e Sobreira, F. (2005) 'Assessing texture pattern in slum across scales. An unsupervised approach' *CASA Working Papers* 87, 1-12 (http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper87.pdf) consultado em 25 de Julho de 2017.
- Barros Filho, M. e Sobreira, F. (2007) 'Urban textures: A multi-scale analysis of sociospatial patterns', *X Computer in urban planning and urban management*, Foz do Iguaçu, 11 a 13 de Julho.
- Batty, M. e Longley, P. (1994) *Fractal Cities* (Academic Press, Londres)
- Benedikt, M. (1979) 'To take hold of space: isovists and isovist field', *Environment and Planning B: Planning and Design* 6, 47-65.

- Burrough, P. A. (1983) 'Multiscale sources of spatial variation in soil: the application of fractal concepts to nested levels of soil variation', *Journal of Soil Science* 34, 577-97.
- De Cola, L. (1989) 'Fractal analysis of a classified Landsat scene', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55, 601-10.
- Dong, P. (2000) 'Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis', *International Journal of Remote Sensing* 2, 3369-73.
- Gefen, Y., Aharony, A. e Mandelbrot, B. (1984) 'Phase transitions on fractals: III infinitely ramified lattices', *Journal of Physics A* 17, 1277-89.
- Hillier, B. (1996) *Space is the machine* (Cambridge University Press, Cambridge).
- Hillier, B. e Hanson, J. (1984) *The Social logic of space* (Cambridge University Press, Cambridge).
- Karperien, A. (2007) *User's guide for FracLac v.2.5*. (Charles Sturt University, Austrália) (<http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fraclac/FLHelp/Introduction.htm>) consultado em 25 de Julho de 2017.
- Kit, O., Lüdeke, M. e Reckien, D. (2011) 'Assessment of climate change-induced vulnerability to floods in Hyderabad, India, using Remote Sensing Data', em Zimmermann, K. (ed.) *Resilient cities and adaptation to climate change: proceeding of the Global Forum 2010* (Springer, Dordrecht) 35-44.
- Lam, N. (1990) 'Description and measurement of Landsat TM images using fractals', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56, 187-95.
- Lin, B. e Yang, Z. R. (1986) 'A suggested lacunarity expression for Sierpinski carpets', *Journal of Physics A* 19, L49-52.
- Loureiro, C. e Amorim, L. (2000) 'O mascate, o juiz, o bispo e os outros: sobre a gênese morfológica do Recife', *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais* 3, 19-38.
- Mandelbrot, B. B. (1967) 'How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension', *Science* 156, 636-8.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The fractal geometry of nature* (Freeman, Nova Iorque).
- Mesev, V. (2003) 'Remotely sensed cities: an introduction', em Mesev, V. (ed) *Remotely sensed cities* (Taylor and Francis, Londres) 1-13.
- Myint, S., Mesev, V. e Lam, N. (2006) 'Urban textural analysis from remote sensor data: lacunarity measurements based on the differential box counting method', *Geographical Analysis* 38, 371-90.
- Oliveira, V. (2016) 'Morfologia urbana: diferentes abordagens', *Revista de Morfologia Urbana* 4, 65-84.
- Owen, K. (2012) 'Geospatial and Remote Sensing-based indicators of settlement types: differentiating informal and formal settlements in Guatemala City', Tese de Doutorado não publicada, George Mason University, EUA.
- Plotnick, R., Gardner, R., Hargrove, W., Prestegard, K. e Perlmutter, M. (1996) 'Lacunarity analysis: a general technique for the analysis of spatial patterns', *Physical Review* 55, 5461-8.
- Pontual, V. (2001) *Uma cidade e dois prefeitos: narrativas do Recife das décadas de 1930 e 1950* (Editora Universitária, Recife).
- Rigatti, D. (2000) 'Order and structure, design and use in housing estates', *Urban Design International* 5, 161-76.
- Steadman, P. (1983) *Architectural morphology* (Pion, Londres).
- Turner, A. (2000 / 2007) *DepthMap v.7.12.00d*.
- Turner, A. (2001) 'Depthmap: a program to perform visibility graph analysis', em Peponis, J, Wineman, J e Bafna, S. (eds.) *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium* (Georgia Institute Technology, Atlanta) 34.1-9.

Tradução do título, resumo e palavras-chave

Convergence of methods of urban form description: analysis of satellite images texture and visual graphical analysis

Abstract. *The paper presents the results of an investigation that aims at integrating different approaches to the analysis of the urban form. The proposed methodology integrates two lines of investigation: i) texture analysis of high resolution satellite images using fractal and lacunarity measures to describe the spatial distribution of pixels with similar grey levels; ii) Visual Graph Analysis (VGA) describing visual properties of spatial systems. A second order analysis is proposed to describe the texture of VGA maps and to investigate to what extent the underlying configurational and texture patterns are correlated. The results reveal how robust the procedures are, particularly in identifying distinct socio-spatial patterns*

Keywords: lacunarity, space syntax, texture analysis, visual graph analysis