



XVII ENANPUR

SÃO PAULO • 2017



O crescimento urbano e os processos de densificação e expansão

Edson Luiz Bortoluzzi da Silva¹, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, edsonlbsilva@gmail.com

Romulo Krafta², Universidade Federal do Rio Grande do Sul, krafta@ufrgs.br

¹ Doutorando do Programa de Planejamento Urbano e Regional, Mestre em Planejamento Urbano e Regional – PROPUR.

² PhD, Docente do Programa de Planejamento Urbano e Regional – PROPUR.

RESUMO

A pesquisa pretende investigar os processos alométricos da morfologia do crescimento urbano a partir das relações entre a densificação edilícia e a expansão do território. Parte do pressuposto que uma vez estabelecido o tecido urbano (largura das vias, tamanho dos quarteirões e conectividade, aspectos morfológicos de difícil transformação), o crescimento pode acontecer de duas formas: pela densificação - acúmulo de edificações nas quadras existentes, ou pela expansão do tecido, com acréscimo de novas áreas urbanizadas. O processo de crescimento inicia-se com a construção de novos edifícios, os quais aumentam a densidade construída, a intensidade e a compacidade do tecido urbano e, em consequência, aumentam a utilização do espaço público (vias). Este aumento na densidade de utilização do espaço público pressiona a expansão do tecido, que ao se efetivar, diminui a densidade construída ao mesmo tempo em que cria novas áreas adensáveis. A edificação das mesmas aumenta novamente a densidade, iniciando um novo ciclo do processo. Parte-se do pressuposto que a cidade é um organismo da categoria dos sistemas complexos e, como tal, apresenta um comportamento crítico auto-organizado cujo padrão advém da relação entre densidade e expansão e define o limiar de criticalidade, ou seja, a elasticidade do sistema. A partir de uma abordagem configuracional, serão construídos indicadores morfológicos e topológicos do tecido urbano que permitirão verificar se as hipóteses de trabalho.

Palavras Chave: Sistemas complexos, metabolismo urbano, densidade e expansão, evolução dos sistemas urbanos.

ABSTRACT

The research intends to investigate the allometric processes of the morphology of urban growth from the relations between the densification of buildings and the expansion of the territory. It is based on the assumption that once the urban fabric (width of streets, block size and connectivity, morphological aspects of difficult transformation) has been established, growth can occur in two ways: by densification - build up of buildings in existing blocks, or by expansion of With new urban areas. The growth process begins with the construction of new buildings, which increase the built density, intensity and compactness of the urban fabric and, as a consequence, increase the use of the public space (roads). This increase in the density of use of the public space presses the expansion of the fabric, which, when it takes place, decreases the built density while creating new large areas. Building them again increases the density, initiating a new cycle of the process. It is assumed that the city is an organism of the category of complex systems and, as such, presents a self-organized critical behavior whose pattern comes from the relation between density and expansion and defines the threshold of criticality, that is, the elasticity of the system. From a configurational approach, morphological and topological indicators of the urban fabric will be constructed that will allow to verify if the hypotheses of work.

Keywords: Complex systems, urban metabolism, density and expansion, evolution of urban systems.

INTRODUÇÃO

A pesquisa pretende investigar a relação entre a Densificação da Forma Construída e a Expansão do Tecido Urbano na constituição do Metabolismo Urbano. Considera que uma vez estabelecido o tecido urbano (largura das vias, tamanho dos quarteirões e conectividade, aspectos morfológicos de difícil transformação), o crescimento pode acontecer de duas formas: pela densificação - acúmulo de edificações nas quadras existentes, ou pela expansão do tecido, com acréscimo de novas áreas urbanizadas. O processo de crescimento inicia-se com a construção de novos edifícios, os quais aumentam a densidade construída que conduz à expansão do tecido urbano, que ao se efetivar, diminui a densidade construída ao mesmo tempo em que cria novas áreas adensáveis. A edificação das mesmas aumenta novamente a densidade, iniciando um novo ciclo do processo. A expectativa é de que a relação entre os processos de densificação construída e expansão do tecido constitua um padrão, a ser verificado estatisticamente. O padrão seria caracterizável pela existência de uma relação entre as quantidades de área construída e as quantidades de área urbanizada, onde o ponto crítico seria justamente aquele momento em que a quantidade de área construída excede o padrão provocando a expansão da área urbanizada. A mensuração deste padrão pode ser realizada com o auxílio das medidas de densidade média (menos provável) e densidade máxima em porções da forma construída e, também, de uma medida mais abstrata de distribuição espacial da forma construída, que pode ser uma das tantas medidas de centralidade disponíveis.

O tema envolve o estudo de uma dinâmica espacial que aparentemente se aproxima da classe dos fenômenos melhor explicados através dos sistemas complexos que envolvem muitos componentes, regras de interação locais, simultaneidade e emergência auto-organizáveis. Várias teorias tentam explicar a complexidade, uma delas é a criticalidade auto-organizada, segundo a qual, ao movimento das atividades resultam reações em cadeia, cujas distribuições no tempo e no espaço ocorrem em todas as escalas seguindo leis de potência. As cidades são exemplos aceitos de sistemas complexos, pois desenvolvem padrões de auto-organização, mas são sistemas artificiais, cujo comportamento, metabolismo, está sujeito a modificações em função da inteligência dos seus agentes. O metabolismo do Crescimento Urbano, entendido como sendo a relação entre as quantidades de forma construída e de área urbanizada, é um caso de evolução cujo comportamento se suspeita ser condizente com esse arcabouço geral.

A investigação dos comportamentos e relações de alometria entre os processos de Densificação da Forma Construída e de Expansão do Tecido Urbano, no âmbito de um processo maior de crescimento da cidade é feita com o auxílio de medidas de densidade e de centralidade, considerando a seguinte hipótese de trabalho: existiria uma relação entre a evolução da forma construída agregada - medida em quantidades de área construída e a de área urbanizada. Esta relação seguiria um padrão qualquer, uma regularidade que parece não ser trivial, visto que as duas variáveis evoluem segundo agregações diferentes - uma varia acrescentando quantidades muito pequenas, continuamente, outra varia agregando quantidades maiores, a intervalos de tempo. Este padrão poderia ser explicado através da criticalidade auto-organizada, que se estabelece pela existência de um ponto crítico e pela distribuição das quantidades de área urbanizada agregadas, a cada tempo, segundo uma lei de potência.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No intuito de alcançar os objetivos desta pesquisa, formulamos na sequência um quadro teórico que procura resgatar o estado da arte do tema em questão, situar este trabalho nesse contexto, e obter foco para o desenvolvimento metodológico desta pesquisa.

Para possibilitar a compreensão lógica desta fundamentação teórica que constrói o conceito principal da tese enquanto apresenta os conceitos consolidados que lhe dão suporte, iniciamos apresentando uma definição prévia de Metabolismo do Crescimento Urbano.

O Metabolismo do Crescimento Urbano consiste no processo onde a Densificação da Forma Construída, ao atingir seu limite, conduz à Expansão do Tecido Urbano.

Fenômeno complexo e teoria da Criticalidade Auto-organizada

Para Batty (2007), a definição mais simples de sistema complexo é "um sistema que é composto por sistemas complexos". Ele ilustra com o exemplo da cidade, cujos elementos, os indivíduos, "têm claramente a mesma ordem de complexidade com qualquer agregação, em grupos ou instituições".

Ele continua, afirmando que o "paradigma da complexidade simplesmente muda o foco, de cima para baixo, para de baixo para cima," e enfatiza que as ações são locais e globais, mas com estrutura e ordem que emergem de baixo para cima, a partir de ações e decisões em que os indivíduos e agentes respondem ao seu ambiente e entre si, de forma competitiva e colaborativa.

Os elementos dos sistemas que compõem o metabolismo do crescimento urbano constituem uma grande variabilidade:

- os edifícios apresentam variabilidade na dimensão geométrica (diferentes alturas e composições formais na sua base), na dimensão dos usos (atividades residenciais, comerciais, serviços e industriais, dentre outras) e na dimensão da magnitude, onde apresentam quantidade variada de área física;
- os loteamentos, por sua vez, apresentam variabilidade na dimensão geométrica (diferentes formas territoriais, forma e número de lotes, tipos de ruas, etc.), na dimensão dos usos (para fins residenciais, comerciais, serviços e industriais, dentre outros) e na dimensão da magnitude, onde apresentam quantidade variada de área física.

Os sistemas complexos apresentam um número muito grande de variáveis e interações, que os impedem de ser estudados por métodos tradicionais que simplificam os fenômenos por meio de modelos de poucas variáveis. O que torna estes sistemas complexos é a sua dinâmica intrinsecamente temporal e a sua imprevisibilidade.

Isto pode ser percebido no tema deste trabalho, no mecanismo de interação entre os processos de densificação edilícia e expansão territorial. Este mecanismo, de crescimento do metabolismo urbano, considera que o estabelecimento de morfologias da Forma Construída (processo de densificação) tem origem na escala local e conduz para rupturas e estabelecimentos de morfologias do Tecido Urbano na escala global, mediados por rupturas de morfologias do Espaço

Público, que emergem na escala local e transitam para a global, num nítido processo de baixo para cima.

Conforme Broto, Allen e Eriksson (2011), estabelecimentos e rupturas de morfologias, também designados estabelecimentos e rupturas de conexões, refere-se aos processos de construção e desativação de elementos morfológicos nos trabalhos que abordam o metabolismo urbano a partir da sua morfologia. No nosso caso, refere-se à construção e demolição edifícios e parcelamentos do solo urbano, por meio de desmembramentos e loteamentos.

O metabolismo do crescimento urbano é um processo dinâmico, pois, pelo menos, em três momentos acontecem decisões que podem gerar continuidades ou descontinuidades:

- na construção de novos edifícios, em substituição aos que são demolidos, representa, respectivamente, a ruptura e o estabelecimento de morfologias na matriz da Forma Construída;
- na intensificação da utilização dos espaços públicos que, ao atingir determinado limite, pode ou não gerar emergências, reações que conduzem ao terceiro momento;
- a implantação de novos loteamentos em substituição as áreas agrícolas produtivas, representa, respectivamente, a ruptura e o estabelecimento de morfologias na matriz Tecido Urbano.

A explosão combinatória resultante deste processo considera estes três momentos de decisão onde em cada um deles a ruptura de morfologias pode ou não levar ao estabelecimento de novas morfologias, e, portanto, resulta num numero muito grande de possibilidades, caracterizando a sua imprevisibilidade. Esta questão, aliada ao fato que é no segundo momento que ocorre ou não a emergência da reação (da expansão do tecido urbano) a densificação da forma construída, na transição entre as escalas local e global, corrobora com a ideia de restringir o foco do estudo ao segundo momento de decisão, que ocorre na matriz espaço público.

A imprevisibilidade e a possibilidade de restrição do foco ao espaço público reforça o entendimento que o metabolismo do crescimento urbano caracteriza-se como um sistema complexo que, envolve os também complexos sistemas Forma Construída e Tecido Urbano, e é mediado pelo igualmente complexo Espaço Público.

No metabolismo do crescimento urbano, a dinâmica que pode conduzir a turbulências é caracterizada por alterações qualitativas na magnitude da Forma Construída, e a emergência de reações que conduzirão à expansão do Tecido Urbano vai depender da forma em que ocorre a transição de fase. Esta transição será normalmente suave, sem gerar reações, mas será abrupta, por meio de turbulências, quando a densidade da forma construída atingir o seu limite, o seu ponto crítico. Neste caso, a turbulência consiste na expansão do tecido urbano.

Para Batty (2007), um sistema é universal se “existir sob diferentes concepções de seus componentes, quer no passado, presente ou no futuro”, pois neste caso não resta dúvida de que se trata do mesmo sistema. Ou seja, a presença do sistema, como um todo, deve ser mais robusta que especificações alternativas da sua microestrutura.

Pode-se então definir que um sistema é universal quando possui propriedades invariantes no tempo e no espaço. Ou seja, quando ao examinarmos o sistema em momentos e escalas espaciais diferentes percebemos que se trata do mesmo sistema. A principal característica da universalidade é a auto similaridade da estrutura espacial.

Batty (2007) apresenta como a auto similaridade se manifesta na definição da ordem hierárquica das cidades:

“elas estão estruturadas em torno de pontos de intercâmbio econômico, tradicionalmente mercados, que formam uma hierarquia de tipos e tamanhos. Esta hierarquia, embora diferenciada por tamanho, mostra semelhanças em diferentes escalas em termos do modo como cidades de diferentes tamanhos dependem umas das outras. A teoria do lugar central sugere que esta ordem hierárquica também é consistente com a escala de distribuição de tamanho da cidade”. (tradução livre de Batty, 2007, p.11).

E também, na estrutura espacial das mesmas:

“Em termos de estrutura espacial, cidades distribuem seus recursos no espaço de tal maneira que suas redes de distribuição preenchem de forma eficiente o espaço, como o transporte de mercadorias e pessoas ao longo redes dendríticas que enchem o espaço mais economicamente. Essas redes existem na mesma forma, com as mesmas propriedades de preenchimento do espaço, em diferentes escalas e através de diferentes épocas em termos de crescimento da cidade”. (tradução livre de Batty, 2007, p.11).

Por fim, argumenta que a ideia de cidade fractal, aquela “que tem uma estrutura que se manifesta na mesma morfologia em diferentes escalas”, é consistente com a noção de universalidade. Constitui-se na sua principal característica e pode ser dimensionada com o auxílio medidas de densidade e dimensão fractal.

No metabolismo do crescimento urbano, a auto similaridade que define a universalidade do sistema pode ser reconhecida a partir da verificação de medidas de densidade e dimensão fractal. As medidas de densidade, quando comparadas em diversos tempos, se resultarem semelhantes podem indicar o atingimento do ponto crítico. Já a dimensão fractal entre as razões das magnitudes da densidade e da expansão pode indicar a universalidade do sistema nos diferentes tempos.

Desta forma, caracterizados os fenômenos complexos e a cidade como um fenômeno complexo e postulado a inclusão do metabolismo urbano na mesma categoria, passamos a apresentar uma das teorias elaboradas para explicar estes fenômenos, a teoria da criticalidade auto-organizada.

Batty (2005) introduz a teoria da criticalidade auto-organizada:

“sistemas cuja morfologia mostra alguma estabilidade através do tempo, provavelmente se encontrem em um limiar crítico que, uma vez perturbado, podem gerar transições abruptas para um novo regime. A impressão digital da criticalidade usada aqui será uma mensuração da dimensão fractal, o que, no caso de cidades, é uma medida da proporção e da extensão com que a cidade preenche seus espaços disponíveis através do crescimento urbano. Existem outras medidas de criticalidade, mas para sistemas reais estas são difíceis de observar a partir de dados, então nosso teste é necessariamente parcial”. (tradução livre de BATTY, 2005, p.430).

Ele testou a teoria na cidade de Búfalo, New York, onde vários atributos na escala do lote, como localização e o ano de construção de todas as propriedades taxadas na área metropolitana, estão registrados desde 1989 e permitiram que ele mensurasse “como a dimensão fractal da cidade tem se transformado nos últimos anos”. E concluiu que sua pesquisa sugere que “a cidade atingiu um ponto crítico” e especula que tanto para esta como para outras cidades pós-industriais emergentes “a principal fase de transição entre o regime urbano corrente para um que é consistente com uma nova era tecnologia é cada vez mais provável”.

O metabolismo do crescimento urbano, por sua vez, pretende estudar o mecanismo que leva o aumento de estoque de forma construída, que gera o processo de densificação da forma construída e, no seu limite, conduz ao processo de expansão do tecido urbano.

No caso do metabolismo do crescimento urbano, a perturbação do sistema ocorre quando a densidade atinge o seu limite crítico, isto gera uma reação. Nas palavras de Batty, esta reação significa uma transição abrupta para um novo regime, onde a reação é a expansão do tecido urbano e o novo regime é um tecido urbano ampliado.

E, no sentido de poder definir e conceituar o mecanismo de reação do metabolismo do crescimento urbano precisamos entender o que é e como funciona o comportamento gerido pelo processo da criticalidade auto organizada – C.A.O. Então, recorreremos a Batty (2005) que sentencia:

“Criticalidade Auto Organizada – SOC - é uma teoria construída em torno destes efeitos de interação. Na essência, a teoria postula que quando atividades iniciam a mover-se no tempo e no espaço, as reações em cadeia que resultam destas mudanças seguem distribuições no tempo e no espaço que ocorrem em todas as escalas. Em outras palavras, estas reações podem alcançar desde um simples e isolado movimento até movimentos que envolvem todas as atividades de um sistema; elas não têm comprimento característico de cadeia em termos de duração, não caracterizam número ou tamanho de atividades envolvidas, e não caracterizam distancia sobre a qual a reação tem lugar. De fato, experimentos com sistemas teóricos sugerem que a duração e o tamanho das atividades envolvidas nestas reações seguem leis de potência. A principal conclusão é que sistemas SOC evoluem para uma forma que incorpora o estado crítico, no qual estas reações continuamente ocorrem de tal maneira que o estado crítico do sistema é preservado”. (tradução livre de Batty, 2005, p. 432).

Bak et al (1988), exemplificam a criticalidade auto organizada dizendo que a interdependência das espécies torna o ecossistema muito sensível a pequenas alterações ou “ruídos”, no entanto, a sensibilidade em demasia não teria permitido a sua evolução até o estado atual. E devido a este equilíbrio necessário diz-se que um sistema deste tipo é “crítico”.

Ele complementa dizendo que o comportamento, ou metabolismo, destes sistemas críticos, dinâmicos e, portanto, complexos é regido pela criticalidade auto organizada, “um fenômeno que aparece em sistemas que evoluem naturalmente para um estado crítico sem tempo ou comprimento de escalas características” e que, ao atingirem este ponto crítico, **“tendem a permanecer nas suas imediações, indo e vindo”**.

Conforme Bak et al (1988), a criticalidade auto organizada está fundamentada em dois fenômenos que representam a impressão digital temporal específica, ou seja, a assinatura de criticidade ou criticalidade da dinâmica de um estado crítico. O primeiro, de efeito temporal, é conhecido como

ruído $1/f$ ou ruído de tremulação ou "ruído Hicker", em que o espectro de potência $S(f)$ escala como $1/f$ em baixas frequências. E o segundo, de efeito espacial, é a propriedade de auto similaridade que gera estruturas com geometria fractal, presentes em abundância na natureza. A ocorrência da auto similaridade no espaço e no tempo gera um fenômeno chamado turbulência.

Batty (2005), a partir dos seus experimentos, conclui que a distribuição de avalanches, expansão do tecido urbano, acontece da seguinte forma:

- no aspecto temporal, o número de avalanches com um tempo de duração t - chamadas "lifetimes" - é dado pela equação $n(t)=t^{-\beta}$ onde o expoente $\beta \sim 1.0$;
- enquanto no aspecto espacial, a distribuição das magnitudes, o número de avalanches de tamanho s é dado pela equação $n(s)=s^{-\mu}$ onde o expoente $\mu \sim 0.4$.

Ele observa que: como tamanhos variam com o tempo, estes expoentes podem ser facilmente relacionados e a relação precisa depende da configuração física do sistema em estudo; e, a linguagem e os métodos da teoria são derivados a partir da estatística física e envolvem ideias de transição de fase, e fazer aparecer um crescimento fractal.

No estabelecimento de morfologias no tecido urbano por meio da adição de novos parcelamentos, os dois efeitos apresentados por Batty e Bak são:

Bak et al (1988) ilustram a ideia básica de criticalidade auto organizada em um sistema de transporte, a "pilha de areia." Propõem construir a pilha adicionando aleatoriamente areia, um grão de cada vez. Ela vai crescer e a inclinação vai aumentar chegando, eventualmente, a um valor crítico, chamado "ângulo de repouso". Se mais areia é adicionada, a inclinação ficará demasiadamente íngreme e a pilha irá entrar em colapso, pois atingiu o estado crítico, de modo que está apenas um pouco estável com respeito a outras perturbações, demonstrando que o estado crítico é um atrator para a dinâmica.

À medida que a altura da pilha atinge dimensões maiores em relação a sua base, deslizamentos (deslocamentos de grãos entre localizações vizinhas) começam a acontecer envolvendo desde apenas os vizinhos locais até todo o sistema, levando ao surgimento de uma forma de organização, a criticalidade auto organizada, que será responsável por definir o metabolismo de funcionamento do sistema, ou seja, a sua dinâmica.

Quando a pilha de areia atinge uma inclinação constante, chamada de ângulo de estabilidade, o sistema é alçado a um estado estacionário e encontra-se, também, no que chamamos de estado crítico.

Neste estado crítico, caracterizado pela imprecisão, não é possível prever qual o tamanho e o instante em que as avalanches irão ocorrer, pois quando deslizamentos locais ocorrem, podem ou não ser geradas avalanches de grandes tamanhos envolvendo todo o sistema. É neste instante que o sistema atinge a criticalidade auto-organizada.

As avalanches, conforme os autores representam as sequências de deslizamentos de grãos na pilha de areia e ocorrem quando a inclinação da pilha atinge o seu estado crítico, pois, para Batty (2005) "o estado crítico da pilha de areia é a sua inclinação".

Vamos utilizar a analogia à pilha de areia para concluirmos a definição que estamos construindo sobre o mecanismo de reação do metabolismo do crescimento urbano, onde a expansão do tecido urbano pela agregação de novos parcelamentos é comparável a uma avalanche.

Podemos então dizer que:

- as formas construídas adicionadas constantemente ao sistema assemelham-se aos grãos de areia;
- a relação entre a quantidade de formas construídas, comparada à área do assentamento (base da pirâmide) constitui o ângulo de inclinação da pilha;
- e, os aumentos na área do tecido urbano assemelham-se as avalanches.

As avalanches são caracterizadas por seus efeitos espaciais e temporais, a saber, respectivamente, tamanho e duração:

- o efeito temporal está expresso nas variações temporais da área de tecido urbano, especialmente, no intervalo de tempo entre uma avalanche e outra e no tempo de duração ininterrupta em que novos parcelamentos são acrescidos ao tecido urbano existente. Derivado deste aspecto pode-se classificar as avalanches pelo seu tempo de duração - denominado "lifetime" por Batty; pela duração dos intervalos sem ocorrência de avalanches e, também, pela distância temporal entre o acréscimo no estoque de Forma Construída e a ocorrência da avalanche.
- e o efeito espacial constitui-se no tamanho da avalanche, ou seja, na magnitude de área territorial da porção acrescida ao tecido urbano.

Então podemos dizer que a avalanche é desencadeada pelo mecanismo de reação do metabolismo do crescimento, o qual é acionado quando ocorre a saturação do sistema urbano, seja pela Densidade ou pela Centralidade da FC.

Isso posto, retomamos a nossa assertiva inicial sobre o que seria o mecanismo de reação do metabolismo do crescimento urbano:

A função do mecanismo é indicar, a cada aumento de densidade ou centralidade da forma construída, se a reação será de continuidade ou de descontinuidade.

A continuidade acontece quando as medidas de densidade e/ou de centralidade ainda não atingiram o seu limiar crítico, enquanto a descontinuidade, também relacionada à noção de catástrofe, ocorre quando uma ou as duas alcançam o seu ponto crítico.

A continuidade implica a manutenção do tecido urbano existente, em outras palavras, nada acontece com a área territorial do tecido urbano.

Já, a descontinuidade implica no estabelecimento de morfologias no tecido urbano com a implantação de novos parcelamentos (loteamentos e desmembramentos). Conforme vimos, para Batty, esta descontinuidade se dá na forma de uma transição abrupta para o novo regime, embora ele mesmo tenha afirmado que as mudanças na cidade são suavizadas com o decorrer do tempo e a mudança de escala. O que nos leva a intuir que a ampliação do tecido urbano deveria ser

classificada como uma transição suave, reflexo de transições abruptas ocorridas na matriz da Forma Construída como resultado de ações individuais. E que, portanto, teremos uma discussão interessante para o decorrer do processo de elaboração da tese.

Carneiro e Charret concluíram que a implementação do modelo da pilha de areia permitiu a visualização das propriedades de imprevisibilidade e do aparecimento de estados críticos comumente encontrados nos sistemas complexos. Assim como Bak, utilizaram os resultados dos tamanhos das avalanches e do número de ocorrências das mesmas como método de análise do experimento.

Para tanto, traçaram os dados produzidos pelas simulações - distribuição dos tamanhos das avalanches e número de ocorrências das mesmas - em um plano cartesiano com os logaritmos dos mesmos, onde o ajuste linear das curvas dos gráficos permitiu a comprovação da existência de leis de potência regendo o fenômeno.

No estudo do metabolismo do crescimento urbano a área territorial urbanizada, permite identificar a ocorrência de avalanches e, então, analisar:

- a distribuição dos tamanhos e dos tempos de duração de avalanches, por meio da frequência das suas distribuições, onde a função de ajuste dos pontos, por meio da equação: $N(\text{AVAL}) = \text{AVAL}^{-\alpha}$, onde α é um parâmetro constante conhecido por expoente ou parâmetro escalar, que, entre 2 e 3, indicará uma função de distribuição do tipo lei de potência, que permitirá inferir que o sistema possui um estado crítico auto organizado;

- e, o comportamento escalar do tamanho e dos tempos de duração das avalanches, onde os seus logaritmos por meio da equação: $N\text{Log}(\text{AVAL}) = \text{LogAVAL}^{-\mu}$, onde o expoente μ é um parâmetro constante conhecido por expoente ou parâmetro escalar, que quando próximo a 1, poderá indicar o atingimento do valor crítico do sistema, bem como evidenciar a presença de um comportamento crítico auto organizado.

Assim, o metabolismo do crescimento urbano por adição de estoques de Forma Construída e Tecido Urbano, em princípio, apresenta as características inerentes ao comportamento crítico auto-organizado que define a dinâmica de sistemas complexos.

Batty (2005), então conclui, afirmando que “a criticalidade auto-organizada é uma boa candidata para explicar a dinâmica voluntária que pode conduzir para algum sistema cuja característica temporal e espacial parece fractal”.

Metabolismo e alometria urbana

Com o propósito de explorar o conceito de metabolismo urbano e como este vem sendo usado nas diferentes disciplinas, um evento foi realizado em 2011, pelo Environmental Institute, da University College London, o qual resultou na publicação: Urban Metabolism at UCL – A working paper, de autoria de BROTO, V.C.; ALLEN, A. e ERIKSSON A.

Conforme Broto, Allen e Eriksson (2011), o conceito inicial e mais tradicional de metabolismo urbano refere-se ao:

“processo metabólico no qual cidades transportam matérias primas, energia e água para dentro do ambiente construído, transformando-os em biomassa e resíduos.” (tradução livre de Broto, Allen e Eriksson, 2011, p.3).

Este processo metabólico refere-se ao conjunto de transformações que ocorrem na cidade de maneira a permitir que esta assimile as pressões a que está exposta e mantenha o equilíbrio do próprio sistema.

Segundo eles, este conceito tem fomentado novas imaginações a respeito de a cidade ser o lugar onde “material e imaterial fluem através da infraestrutura e de diferentes economias”, sendo responsável pela mediação e reprodução desta entidade biofísica e socioeconômica denominada cidade. Dentre as várias ideias, a que mais tem se destacado é a de pensar sobre como as cidades podem ser sustentáveis a partir da priorização de fluxos realizada pelos arranjos sociais e econômicos.

Eles classificaram os trabalhos dos diversos autores que tem se dedicado a reflexão sobre o metabolismo urbano em três perspectivas: a perspectiva da analogia Funcional, que enfatiza o metabolismo urbano como condutor das funções de reprodução da cidade; a perspectiva da analogia Formal, que usa o conceito como ponto de entrada para a configuração interna da cidade; e, por fim, a perspectiva da Produção dialética, que enfatiza o metabolismo urbano na direção da produção e distribuição das economias urbanas.

A perspectiva da analogia Formal – visão morfológica - demonstra ser a mais adequada para o metabolismo do crescimento urbano em virtude da ênfase na organização interna do organismo e na interconexão de suas partes.

A visão morfológica do metabolismo urbano dialoga com a fisiológica ao conceituar a cidade como um sistema de componentes sociais e ecológicos. Neste sentido, estende o foco dos recursos para processos sociais, enfatiza a anatomia do organismo a partir da sua organização interna e alterna a atenção da circulação para a interconexão.

Tanto é assim, que Tyler (2011) afirma ser a cidade uma coleção de pessoas antes de ser uma coleção de objetos e, ainda, que como organismos vivos, as cidades também morrem.

Batty (2011), como já visto, complementa dizendo que as cidades são “sistemas auto-organizados que crescem organicamente de baixo para cima” compostos de pessoas e construções, as quais são entidades com tempo de vida limitado e que por isso “tem de ser renovadas continuamente.”

Esta visão, ao enfatizar a organização interna da cidade pressupõe a mudança da escala global para a escala local, propiciando o entendimento dos mecanismos que conduzem a dinâmica do sistema.

Segundo Tyler (2011), os princípios estruturais internos da cidade são a questão principal do metabolismo urbano.

Já conforme Broto, Allen e Eriksson (2011),

“É assumido que a estrutura interna das cidades organiza e determina os processos de crescimento e decaimento em diferentes áreas urbanas, da mesma forma que o DNA define certos traços e doenças no corpo humano”.
(tradução livre de Broto, Allen e Eriksson, 2011, p.7).

Eles também definem disfuncionalidade como sendo as “áreas da cidade que podem impedir o desenvolvimento do metabolismo” e justificam a importância do conceito para compreender as implicações normativas da abordagem de analogia morfológica. Eles afirmam também que, especialmente no contexto da globalização, a configuração é determinada por processos ocorridos em outras escalas.

Estas afirmações iniciais sobre o conceito da perspectiva morfológica de metabolismo urbano são importantes para começarmos a entender o tema da pesquisa, ou seja, como os processos de Densificação da Forma Construída e Expansão do Tecido Urbano forjam o metabolismo do crescimento urbano.

Batty (2011) afirma que, particularmente quando se considera o relacionamento das cidades por meio de redes, “a seiva da cidade é dinheiro e informação”, mas para Revell (2011) é muito mais que fluxo de recursos, “a pessoa é que faz o metabolismo.” Já para Alan (2011) o desafio central é “reconhecer que não é somente fluxo de materiais, imagens e dinheiro, mas também fluxo de pessoas que definem padrões de globalização”, e que os vínculos pessoais e comunitários “transcendem e tecem” as noções de fronteira.

A partir desta preocupação, passamos a definir o que se entende por fluxo na morfologia da cidade, ou melhor, que elementos da cidade são capazes de desenvolver conectividades e ligações.

A matriz Espaço Público (EP) é formada pelo conjunto de “subespaços” que constituem as vias urbanas, e para possibilitar a sua função precípua – garantir os deslocamentos urbanos - encontram-se interconectados em maior ou menor grau e, por isso mesmo, possibilitam o desenvolvimento de muitos outros tipos de conectividades, como os fluxos materiais e imateriais de pessoas, cargas e, especialmente, as comunicações, que permitem a criação dos vínculos pessoais e comunitários citados por Alan.

Na perspectiva morfológica do metabolismo do crescimento urbano adotada neste trabalho, o Espaço Público, descrito como um conjunto de lugares conectados entre si constitui o meio para parcelar o território, e ocupar cada parcela com formas construídas e atividades. O sistema espacial constituído pelas unidades de espaço público, parcelas ocupáveis de espaço privado, e formas construídas, firmemente interconectadas, apresenta características hierárquicas capazes de gerar diferenciação. Isso acarretaria que diferentes magnitudes de densidade da forma construída podem atingir o ponto crítico em diferentes localizações do tecido urbano.

Desta forma, o Espaço Público, sendo parte do metabolismo do crescimento urbano, é responsável por valorar diferenciadamente as porções de forma construída, tornando a densidade das mesmas uma medida relativa, pois depende da sua localização no tecido urbano.

Mas Allen (2011) preconiza que uma perspectiva metabólica, além de se cercar de um largo conjunto de fluxos, precisa ser “produtivamente expandida para apreender se tais fluxos estão conduzindo para ligações recíprocas ou debilitadas entre cidade e regiões urbanas maiores”, pois isso evitaria uma abordagem que trata a cidade como ilha. Ele enfatiza que este link do

metabolismo urbano-rural é útil para mensurar a tendência a sustentabilidade da urbanização e se esta conexão interno-externo, “conduz para um desenvolvimento sustentável e recíproco de ambos, cidade e adjacências.”

Isto consolida a ideia de que, no conceito de metabolismo que está sendo construído:

- o “largo conjunto de fluxos”, termo usado por Allen (2011), é constituído pelas conectividades do espaço público que relativizam o estudo à estrutura topológica do tecido urbano;
- e o “link do metabolismo urbano-rural”, é representado pelas perdas de terreno rural, muitas vezes produtivo, para a expansão do tecido urbano.

Neste contexto, da perspectiva morfológica do metabolismo, o estabelecimento e a ruptura de morfologias são os processos anabólicos e catabólicos. Os processos anabólicos são processos de síntese, onde novas estruturas são ligadas pela incorporação de formas adicionais de energia. Enquanto os processos catabólicos são aqueles nos quais as estruturas são quebradas (desligadas) para extrair energia para manutenção dos primeiros.

No metabolismo urbano em construção, os processos anabólicos estão representados pelos processos de Densificação da Forma Construída e de Expansão do Tecido Urbano, enquanto os catabólicos, pelos edifícios que são demolidos para darem espaços para outros mais lucrativos e pelas terras rurais que são urbanizadas.

Nestes dois processos, de Densificação da Forma Construída e de Expansão do Tecido Urbano, de um lado, novos edifícios e novos loteamentos são as novas estrutura ligadas ao espaço público existente, por meio da incorporação de recursos financeiros que representam as formas adicionais de energia. E de outro, os edifícios demolidos e as terras que deixam de ser rurais, são as estruturas quebradas ou desligadas para extrair energia, ou seja, dar espaço para as novas estruturas:

- na matriz Forma Construída, a destruição de edifícios, geralmente com área construída menor que a máxima permitida e, que em razão disto propiciam retorno econômico menor que o possível naquele lugar, representa os processos catabólicos; cuja destruição permite a construção de novos edifícios com áreas construídas dentro do máximo permitido, e conseqüentemente, com maior retorno financeiro, os quais são os processos anabólicos;
- enquanto, na matriz Tecido Urbano, o empreendimento de novos loteamentos constitui processos anabólicos; enquanto os processos catabólicos são, muitas vezes, a perda de área rural produtiva para agricultura. Nesta transição, geralmente, um pequeno recurso investido em produção agrícola que gera certo retorno financeiro, é trocado por um investimento bem maior em urbanização, o qual trará um retorno financeiro maior que o anterior. Nesta troca, que constitui um processo de estabelecimento e ruptura e ligações, ou seja, de construção e quebra de morfologias, geralmente perde o meio ambiente e o cidadão, razão pela qual a expansão territorial das cidades é evitada pelos urbanistas que tendem a considerar cidades mais compactas e densas como cidades mais ecológicas.

No metabolismo em construção neste trabalho acontecem rupturas e estabelecimento de morfologia nas quatro matrizes da forma urbana.

As rupturas de morfologia são as seguintes:

- no Espaço Privado as rupturas ocorrem quando os terrenos deixam de remunerar adequadamente seus proprietários ou abrigam usos que se tornaram incompatíveis com o entorno ou região;
- na Forma Construída acontecem rupturas quando edifícios são demolidos, para dar lugar a outros mais rentáveis economicamente e adequados a novos usos e tecnologias, geralmente motivadas pelas rupturas no Espaço Privado;
- no Espaço Público as rupturas nas morfologias equivalem a perdas nas conectividades que acontecem quando trechos de via são interrompidos ou conversões são proibidas, muitas vezes pela própria redução na fluidez do tráfego, geralmente motivadas pelo processo de densificação da Forma Construída, onde as rupturas anteriormente citadas habilitam o estabelecimento de novas estruturas;
- e, no Tecido Urbano as rupturas ocorrem quando áreas rurais deixam de ser aproveitadas pelo setor primário para serem parceladas para fins urbanos.

Já os estabelecimentos de morfologias são:

- no Espaço Privado se estabelecem morfologias quando os terrenos, em reação as rupturas citadas, passam novamente a remunerar adequadamente seus proprietários e a abrigar usos compatíveis com o entorno ou região;
- na Forma Construída as morfologias estabelecidas correspondem aos novos edifícios, economicamente mais rentáveis e adequados aos novos usos e tecnologias. Estas novas morfologias, geralmente habilitadas pelas rupturas já citadas nesta matriz, ocasionam alterações estruturais na mesma, constituindo o processo de Densificação da Forma Construída;
- no Espaço Público as morfologias que se estabelecem são as conectividades dos subespaços públicos existentes com as novas ruas criadas, geralmente em decorrência do processo de Expansão do Tecido Urbano;
- e, no Tecido Urbano o estabelecimento de morfologias corresponde a incorporação de novas porções de tecido (novos loteamentos) ao existente, constituindo-se no processo de Expansão do Tecido Urbano. O estabelecimento destas morfologias, assim como na Forma Construída e no Espaço Público, também gera alterações estruturais na morfologia urbana.

Voltando a questão da alternância de escalas na visão morfológica do tecido urbano, recordamos que Batty (2011) diz que “as cidades são sistemas auto-organizados que crescem organicamente de baixo para cima”, ou seja, onde os estabelecimentos e rupturas de morfologias são individuais, de natureza privada, por isso, constituem a escala local ou micro, conduzem a estabelecimentos e rupturas de morfologias coletivas, de natureza pública, integrantes da escala global ou macro.

Assim:

- no Espaço Privado, os estabelecimentos e as rupturas de morfologias são individuais e pertencem a escala local, pois acontecem em porções territoriais individualizadas (terrenos) para atender a interesses também individuais (proprietários dos terrenos) e são, na maior parte das vezes, de propriedade privada;
- na Forma Construída os estabelecimentos e as rupturas de morfologias, na mesma linha do espaço privado, também são individuais e enquadram-se na escala local, pois acontecem em porções individualizadas (edifícios) para atender a interesses também individuais (proprietários dos edifícios) e são, na maior parte das vezes, de propriedade privada;
- já, no Espaço Público os estabelecimentos e as rupturas de morfologias são individuais e pertencentes à escala local, mas repercutem na escala global, pois os seus reflexos não ficam limitados aos subespaços cuja conectividade foi alterada, mas se estendem em maior ou menos intensidade, aos demais. Então, é no espaço público que o processo de crescimento passa da escala local para a global;
- por outro lado, no Tecido Urbano os estabelecimentos e as rupturas de morfologias, enquadram-se na escala global, visto que, apesar de envolverem espaços individualizados (terrenos) de natureza privada, as novas vias são espaços de natureza pública.

Retomando, e recordando, as palavras de Batty (2011), “as cidades são sistemas auto-organizados que crescem organicamente de baixo para cima”, percebe-se que o momento, o “start” do crescimento, ocorre com a mudança de escala. E isto acontece quando estabelecimentos de morfologias da Forma Construída - escala local, conduzem a rupturas e estabelecimentos de morfologias do Tecido Urbano - escala global, mediados por rupturas e estabelecimento de morfologias do Espaço Público, que acontecem na escala local e refletem na global.

Esta consideração restringe o foco deste trabalho de pesquisa. Enquanto o metabolismo urbano envolve estabelecimentos e rupturas das quatro matrizes da forma urbana (Espaço Privado, Forma Construída, Espaço Público e Tecido Urbano), o metabolismo do crescimento urbano relaciona as matrizes Forma Construída e Tecido Urbano, a partir de um padrão alométrico que determina o ponto crítico da densidade, o qual é relativizado pela centralidade estabelecida no Espaço Público, por meio das conectividades dos novos loteamentos.

Ao final, Broto, Allen e Eriksson (2011) apresentam as taxas metabólicas como sendo o resultado das transformações morfológicas ocorridas na cidade. Dizem que estas taxas, mesmo sendo homogêneas na escala global, podem ser heterogêneas quando olhas na escala local. Afirmam também, que elas são abordagens “concernentes com questões de alometria urbana”.

Concluindo, este trabalho ao visar o metabolismo do crescimento urbano pela perspectiva morfológica, pretende descobrir se existe uma regra que determine as condições para que rupturas de morfologias da Forma Construída conduzam ao estabelecimento de morfologias do Tecido Urbano. Considerando que o foco não está em explicar o metabolismo, ou seja, descobrir o que e como é acionado, com que objetivo, mas em descobrir se o processo específico envolvendo acréscimos de forma construída e de área urbanizada segue um padrão identificável, o que

indicaria a existência de um metabolismo, em outras palavras, de uma relação consistente de produção dessas duas matrizes de modo associado.

Passamos então a abordar o tema da alometria urbana.

As transformações na Forma Construída e no Tecido Urbano, em função do estabelecimento e rupturas de morfologias, são estudadas por um ramo da ciência denominado Alometria. O qual estuda o tamanho das partes (elementos) em relação a outras e ao todo (sistema).

O físico West (2010) em palestra sobre as regras de escala afirma que, assim como a biologia estuda a alometria dos animais, os elementos e estruturas urbanas funcionam em rede e também apresentam relações de escala que nos permitem estudar as cidades sob a luz da alometria.

“É óbvio que uma cidade, ou até mesmo uma empresa, tem estrutura de rede. Nem só no nível social, como também no nível físico, uma cidade tem estradas e estações de gás e gasodutos, que são redes. Mas também tem algo mais abstrato e, em alguns casos, algo mais sofisticado do que na biologia. E isto são redes de interações sociais, que são onde as coisas como a informação e o conhecimento estão sendo traduzidos. Se você voltar para a biologia, outra maneira de dizer isso é que - vamos apenas pensar em mamíferos. O fato de que a baleia está no oceano e o elefante tem uma grande tromba e a girafa tem um pescoço longo e nós andamos sobre duas pernas e o rato corre ao redor, estas são todas as características superficiais. E em termos de sua funcionalidade, a sua concepção fisiológica, sua organização, sua história de vida, a essência do que eles são, na verdade, todas as versões em diferente escala um do outro. Nós somos, em algum nível de 90 por cento, apenas um rato em maior escala. E a pergunta é, isso é verdade nas cidades? New York é apenas um escala maior de San Francisco, que é uma Boise em escala maior, que é uma escala maior de Santa Fé, mesmo que elas parecem completamente diferentes? Então, o que nós fizemos é olhar para todos esses dados, tudo a partir do número de postos de gasolina, comprimento dos cabos elétricos, número de patentes que produzem, número de policiais e crimes e propagação da doença AIDS e salários, tudo o que poderia colocar em suas mãos, e perguntar: “Se você olhar para essas funções de tamanho da cidade (população), há alguma progressão sistemática?” E para nosso espanto, na verdade, isso existe. Então, de alguma forma média, Santa Fe é uma escala reduzida de New York City.” (tradução livre de West, 2010).

O estudo destas relações de escala permitiu, já na década de 1940, que o linguista da Universidade de Harvard, George Kingsley Zipf, elaborasse uma lei empírica (conhecida por Lei de Zipf) que rege a dimensão, importância e/ou frequência dos elementos de uma lista ordenada. Ou seja, uma lei de potências sobre a distribuição de valores de acordo com o nº de ordem numa lista, onde o segundo elemento se repetirá com uma frequência que é aproximadamente a metade do primeiro, e o terceiro elemento com uma frequência de 1/3 e assim sucessivamente.

Já Batty, no artigo Building a Science of Cities de 2011, dedica o item Size, Shape, Scale and Space: Three Laws of Scaling ao estudo das relações de escala dos componentes da cidade, entre si e com o todo, e entre as cidades, ou seja, a **alometria urbana**. Inicia com o que havia afirmado em 2008: “o que liga todas estas formas e processos em conjunto é a ideia de ‘escalar’”. Embora o verbo escalar não tenha o mesmo significado na Língua Portuguesa, os verbos que mais se aproximam são graduar e progredir, ou ainda, transformar, mas aí teríamos que acrescentar transformar sem perder a essência, ou seja, uma transformação limitada por regras de “hereditariedade”. Ele explica que um objeto ‘escala’ quando “de alguma maneira se assemelha a um objeto maior ou

menor da mesma forma”, com o qual deve guardar alguma regularidade, podendo apresentar distinções. Ele exemplifica com uma afirmação de Bonner, 2006: “se um objeto escalar com respeito ao seu espaço, isto significa que a sua forma espacial pode ter as mesmas proporções que um objeto maior ou menor”. E continua afirmando que provavelmente estas proporções vão apresentar alguma distorção motivada pela alteração do tamanho, para poder conservar algumas funções críticas. Cita o exemplo do meio de transporte urbano que apresenta modal e tecnologias diferentes com características físicas e de movimento adequadas aos diversos tamanhos de cidade.

Este trabalho visa o metabolismo do crescimento urbano pela perspectiva morfológica e pretende descobrir se existe uma regra de alometria urbana que determine as condições para que estabelecimento de morfologias da Forma Construída conduza ao estabelecimento de morfologias do Tecido Urbano.

Para tanto se faz necessário abrir a caixa-preta da cidade, mudar da escala global para a local, para verificar as heterogeneidades nos estabelecimentos e rupturas de morfologias.

Assim a análise do metabolismo do crescimento urbano, tema desta pesquisa, inicia-se pelo conhecimento da densidade da Forma Construída e da distribuição das suas magnitudes, para posteriormente, introduzir a estrutura espacial, cujo relacionamento dos Espaços Públicos é responsável pela constituição da medida de centralidade. O estudo, então, perpassa as seguintes análises da Forma Construída: densidade total, distribuição da densidade parcial e densidade máxima, centralidade total, distribuição da centralidade parcial e centralidade máxima.

Batty, Carvalho, Hudson-Smith, Milton, Smith, e Steadman (2007) consideram que:

“a ideia de “escalar” em cidades está fortemente relacionada com as limitações que a geometria impõe a densidade e a proximidade e, portanto, vamos examinar as distribuições de tamanho de edifícios em termos da sua dimensão euclidiana - área, perímetro, altura e assim por diante – a partir do argumento, um tanto vago, que estes tamanhos refletem a demanda por população e emprego. Além disso, como edifícios crescem em tamanho, a sua forma deve mudar para lhes permitir funcionar e, portanto, o seu dimensionamento pode ser ligado à sua alometria.” (tradução livre de Batty, Carvalho, Hudson-Smith, Milton, Smith, E Steadman, 2007, p.3).

Se no trabalho de Batty e sua equipe, as dimensões euclidianas dos edifícios “escalam” (variam de proporção) em função da demanda por população e emprego, no nosso caso, a magnitude da Forma Construída (expressa pela medida de densidade da forma construída) “escala” a partir de demandas por espaço construído para abrigar atividades. O que nos permite examinar as distribuições de magnitude da forma construída por meio das magnitudes da densidade da forma construída.

Enquanto os autores relacionam atividade socioeconômica à construção de geometrias dos edifícios, nós vamos relacionar a atividade socioeconômica à densidade por forma construída. E, neste caso, especula-se a existência de alguma relação de proporcionalidade entre estes dois fenômenos e com o processo de expansão do tecido urbano. E assim, surge a pergunta: será que uma maior densidade, ao expressar maior grau de atividade socioeconômica, guarda relação direta de proporcionalidade com a sensibilização do comportamento que conduz a expansão do tecido urbano?

E continua-se perguntando, o mecanismo que conduz a densificação da forma construída à expansão do tecido urbano é acionado quando: a densidade total atinge determinado limite? a densidade de alguma(s) porção(ões) da forma atinge determinado limite? ou ainda, se a distribuição das magnitudes de densidade da forma construída muda seu comportamento, passando, por exemplo, de uma distribuição exponencial a uma por lei de potencia ou vice-versa?

Batty, Carvalho, Hudson-Smith, Milton, Smith, e Steadman (2007) introduzem a ideia de escala a uma ordem subalterna no tamanho dos elementos e relacionam isto com métodos que possibilitam representar esta ordem com densidades e distribuições.

Assim, ao classificar os tamanhos da densidade e da centralidade parcial da forma construída, para todas as porções do sistema, espera-se encontrar uma distribuição log normal, pois isto demonstraria que as duas medidas seguem a forma de economias de aglomeração e efeitos competitivos. Ou seja, que teríamos poucas porções de forma construída com grande densidade e muitas com pequena densidade.

Cabe ressaltar que nestas análises de distribuição o espaço não esta sendo considerado, apenas as ordens de tamanhos ou magnitudes.

No metabolismo do crescimento urbano, tema desta pesquisa, vamos usar funções estatísticas, que permitam relacionar os dados das variáveis Forma Construída e Tecido Urbano, para comparar a evolução da Forma Construída e a Expansão do Tecido Urbano, com intuito de verificar se existe uma regra alométrica que relaciona as magnitudes da primeira com os momentos de expansão do último.

E concluímos, mostrando que enquanto Batty e sua equipe incluem o espaço como argumento de análise, nós incluímos o tempo. Visto que ao comparamos dados de uma série histórica poderemos verificar se as magnitudes da Forma Construída guardam alguma constância entre os diversos tempos em que ocorre a expansão do tecido urbano. Se essa função de correlação apresentar uma escala invariante, isto indicaria uma distribuição de pontos fractal, o que, conforme Kerscher, Szapudi e Szalay, é esperado em fenômenos críticos.

METABOLISMO DO CRESCIMENTO URBANO

O **Metabolismo do Crescimento Urbano** consiste no processo de evolução da forma urbana, de baixo para cima, onde a Densificação da Forma Construída quando desequilibra a alometria com o Tecido Urbano, atinge seu ponto crítico e, assim, conduz à Expansão deste tecido.

Evidentemente que esta definição terá validade científica se a hipótese desta pesquisa restar comprovada.

Processos do Metabolismo do Crescimento Urbano

O Metabolismo do Crescimento Urbano é constituído dos processos de **Densificação da Forma Construída e de Expansão do Tecido Urbano, cujo relacionamento dinâmico é mediado pela conectividade** do Espaço Público no **estabelecimento do crescimento urbano**.

Densificação da Forma Construída

A densificação urbana, termo genérico, remete de imediato ao aumento da densidade de uso e ocupação do solo urbano e, conforme Krafta e Neto (2011), pode ocorrer por meio “da substituição dos edifícios, das mudanças de uso da terra, e do surgimento de novas centralidades”.

No estudo do metabolismo do crescimento urbano vamos definir o **processo de** Densificação da Forma Construída como sendo o aumento dos estoques de forma construída, ou seja, o aumento de área construída dos edifícios acumulada no tecido urbano.

O estabelecimento de morfologias na matriz Forma Construída, representado pela construção de novos edifícios, muitas vezes ocorre em substituição de edifícios que perderam seu valor econômico, seja em decorrência de possuírem área construída menor que a máxima permitida naquele lugar, seja por sua incapacidade de adaptar-se aos novos usos e tecnologias, etc. Estes edifícios demolidos geram rupturas de morfologias na Forma Construída, as quais dão espaço a construção de novos edifícios, ou seja, ao estabelecimento de novas morfologias nesta matriz.

Então, estas morfologias estabelecidas na Forma Construída, construção de novos edifícios, aumentam o estoque da forma construída em relação ao estoque de tecido urbano. Este desequilíbrio na proporção entre as duas matrizes faz o sistema urbano alcançar o seu estado crítico, onde qualquer nova porção de forma construída adicionada pode conduzir ao estabelecimento de novas porções de tecido urbano, avalanches cujo tamanho e tempo de duração são imprevisíveis.

Expansão do Tecido Urbano

E, na outra “ponta” do metabolismo do crescimento urbano vamos definir o **processo de** Expansão do Tecido Urbano como sendo o aumento dos estoques de tecido urbano, ou seja, o aumento da área territorial parcelada para fins urbanos.

As morfologias estabelecidas no Tecido Urbano por meio do incremento da área urbanizada são tratadas analogamente ao modelo da pilha de areia desenvolvido por Bak e, assim, são denominadas avalanches.

Especula-se que o que deflagra o processo de ocorrência de avalanches, é o atingimento do ponto crítico na relação alométrica entre as quantidades de forma construída e quantidades de tecido urbano. Assim, a mensuração da expansão do tecido urbano é realizada a partir da análise das ocorrências de avalanches. O estudo estatístico destas ocorrências, seus tamanhos e tempos de duração, permite descrever os padrões dinâmicos do sistema, em especial, o que acontece nos momentos que antecedem e sucedem o atingimento do ponto crítico, em outras palavras, as flutuações do sistema.

Dinâmica do crescimento Urbano

Parte-se do pressuposto que sistemas urbanos estão em constante transformação.

Tomemos o exemplo de uma cidade qualquer.

Num determinado momento apresenta todos os seus lotes ocupados com edifícios com índice de aproveitamento 1, teríamos então, que a relação entre área construída e área urbanizada útil, seria $1/1=1$.

Passados 20 anos, se o acréscimo de área construída fosse 10% e o acréscimo de área urbanizada fosse também de 10%, a relação continuaria sendo 1, e o sistema seria isométrico; se, ao contrário, um dos elementos crescesse mais do que o outro, o sistema teria comportamento alométrico, sub ou superlinear.

No nosso caso, como os acréscimos ocorrem segundo quantidades discretas diferentes (a Forma Construída em doses muito pequenas e muito frequentes e o Tecido Urbano em doses maiores e menos frequentes) surge a possibilidade da existência de um ponto crítico. Isso quer dizer que entre uma expansão do tecido urbano e outra, o sistema tem comportamento alométrico, porque um dos elementos está crescendo e o outro não. Considerando a Forma Construída como variável de referência, o sistema nesse intervalo é superlinear.

Quando ocorre um novo loteamento (expansão do tecido urbano, avalanche), o sistema pode se modificar de três formas: a) voltar a mostrar padrão isométrico (muito difícil, pois seria necessário que a quantidade de área urbanizada acrescentada fosse igual à de área construída verificada no intervalo), b) manter o comportamento alométrico do intervalo, com a mesma superlinearidade (acrécimo de área urbanizada ainda é menor do que o acréscimo de área construída no período), ou c) mudar para sublinear, quer dizer, acrescentar tanta área urbanizada nova que a relação desta com a quantidade de área construída cairia para menos de 1.

Mas o processo continua, num segundo suposto intervalo, sucessivos acréscimos micro de Forma Construída se sucedem até que outra avalanche ocorre.

Essa nova avalanche pode ocorrer no mesmo ponto crítico (mesma valor de densidade média, ou de densidade máxima, ou de centralidade, conforme o indicador de ponto crítico que se adote) ou não.

Se a avalanche ocorrer com um ponto crítico mais alto que o anterior, situação mais provável, significa que o sistema é auto similar, mas não repetitivo, pois a densidade, ou a centralidade que dispara a mudança de estado aumenta com o tempo.

O sistema ao atingir o seu ponto crítico torna-se instável e, nesta situação, mesmo pequenos aumentos de forma construída podem ser suficientes para fazer emergir comportamentos de reação que desencadeiam avalanches.

É de se esperar então, que sendo o sistema urbano possuidor de uma dinâmica crítica auto-organizada, as avalanches sejam geradas em diversos tamanhos e tempos de duração distribuídos segundo uma lei de potencia, ou seja, poucas grandes e duradouras avalanches e muitas pequenas e rápidas avalanches.

Resumindo, o ponto crítico é atingido quando, hipoteticamente, a relação entre quantidade de forma edificada e de terra urbanizada atinge determinado valor que se acredita possa ser expresso pelas medidas de densidade e de **centralidade, a qual, ao agregar a estrutura topológica do tecido urbano, descreveria o processo com mais acuidade.**

Então, o reconhecimento e a mensuração da dinâmica do metabolismo do crescimento urbano podem ser realizados com o auxílio de medidas morfológicas e topológicas, as quais serão apresentadas na sequência.

Medidas do Metabolismo do Crescimento Urbano

A observação e mensuração dos processos do metabolismo do crescimento urbano são realizadas a partir da constituição de quatro medidas.

Medida de Densidade da Forma Construída (DENS)

Numa visão morfológica do metabolismo do crescimento urbano, a primeira noção que ocorre quando queremos caracterizar a matriz da forma construída é a ideia de densidade.

A densidade é uma medida que mostra a distribuição de uma quantidade qualquer por uma unidade de espaço. Neste trabalho quando falamos em densidade estamos nos referindo à distribuição das edificações no tecido urbano, ou seja, a densidade edificada, bem como a relação da sua magnitude com a magnitude do Tecido Urbano.

A densidade edificada mensura quão compacta ou intensa é a ocupação do tecido urbano por edificações e como está distribuída, permitindo que se façam ilações a respeito da alometria entre a Matriz Forma Construída e a Matriz Tecido Urbano.

Embora a complexidade comportamental dos processos envolvidos no metabolismo do crescimento urbano, a medida de densidade pode ser a mais simples possível, visto que o objetivo da mesma é verificar quando a evolução e a distribuição espacial e temporal da magnitude da forma construída atinge seu ponto crítico em relação a magnitude do tecido urbano.

Assim, neste trabalho, a Densidade da Forma Construída é definida como sendo a magnitude do estoque de forma construída em relação à magnitude de área territorial do tecido urbano. E, para tanto, será expressa pela equação: $DENS=FC/TU$, onde, FC é a quantidade do estoque de forma construída, representado pela magnitude de área construída e TU é quantidade de tecido urbano, representado pela magnitude da área territorial urbanizada.

A Densidade da Forma Construída, como já abordamos, pode ser mensurada para diversas agregações espaciais e temporais. Nesta pesquisa utilizaremos a Densidade agregada ao máximo – todo o Tecido Urbano da cidade, e ao mínimo – cada conjunto de lotes adjacentes as porções de espaço público.

Porém, a medida de densidade deixa a desejar por não considerar a localização das porções de forma construída. Neste sentido, propõe-se a inclusão da topologia do Espaço Público com o auxílio da medida topológica de centralidade.

Medida de Centralidade da Forma Construída (CENT)

A medida topológica de Centralidade pode incluir a estrutura da Matriz Espaço Público, por meio da relação topológica dos seus subespaços, na análise da alometria entre as matrizes Forma

Construída e Tecido Urbano. Este trabalho considera a densificação como um processo que surge em nível local (em cada lote, quadra, bairro,...), ou seja, na escala micro, intraurbana, e origina reações que se expressam ao nível do tecido urbano como um todo, na escala macro. Para continuar a análise deste processo de densificação propõe-se o uso de um segundo indicador, este baseado na medida topológica de centralidade.

Para Krafta (2009), a medida de centralidade é:

“[] capaz de mensurar a ‘quantidade relativa de cidade depositada em cada entidade espacial’ ao identificar a diferenciação espacial correspondente à intensidade de atividades urbanas (residenciais, comerciais,...), bem como dos fluxos de veículos e pedestres nos diversos espaços do sistema de espaços públicos” []. Krafta (2009)

Com isso, acredita-se que a aplicação da medida de centralidade possa auxiliar na identificação, por meio da análise distributiva dos valores de centralidade nos diversos espaços públicos, da emergência de valores críticos na forma construída.

Os indicadores de Centralidade serão fundamentados na medida topológica de Centralidade proposta por Krafta, a partir do relacionamento entre a variável área construída (**com dados agregados** por faces de quadra adjacentes a cada espaço público) e as conectividades dos subespaços públicos (desagregados por trechos entre interseções das vias), bem como da sua posterior agregação ao sistema como um todo.

Medida de Expansão do Tecido Urbano (EXP)

A medida de **Expansão do Tecido Urbano** visa identificar a ocorrência de avalanches, ou seja, a expansão do tecido urbano, e mensurar o tamanho e o tempo de duração das mesmas. E tem por objetivo descrever a alometria do processo de expansão do tecido urbano. O que ocorre em etapas: inicialmente são identificados os tempos em que há acréscimo na magnitude do tecido urbano. Cada conjunto de tempos ininterruptos com acréscimo de área de tecido urbano representa uma avalanche.

Cada avalanche é analisada e classificada sob dois aspectos:

- o aspecto temporal representa a duração da avalanche, ou seja, o número de períodos de tempo em análise (dia, mês, ano,...) que a avalanche se estende;
- o aspecto espacial representa o tamanho da avalanche, calculado a partir da média das magnitudes de acréscimo de tecido urbano em cada período de tempo da avalanche.

A identificação de cada evento avalanche, designada neste trabalho ocorrência de avalanche, permite verificar se essas ocorrências correspondem com os pontos críticos identificados nas medidas de densidade e centralidade. O que desde já, permite inferir qual das duas medidas descreve melhor, com mais acurácia, a relação entre os processos de densificação da forma construída e expansão do tecido urbano, ou seja, o metabolismo do crescimento.

Por outro lado, a análise da distribuição das frequências dos tamanhos e tempos de ocorrência das avalanches pode indicar se o metabolismo do crescimento urbano é um processo crítico auto-organizado.

Esta análise é fundamentada na primeira lei de escala apresentada por Batty(2011), a chamada regra de classificação dos tamanhos com origem na Lei de Zipf. A distribuição das frequências de ocorrência do tamanho e do tempo de duração das avalanches, se resultar em distribuições do tipo lei de potência, indicaria a presença da criticalidade auto-organizada. Neste caso teríamos poucas avalanches muito grandes e muitas avalanches de pequeno tamanho e poucas avalanches com muito tempo de duração (longas) e muitas com pequeno tempo de duração (curtas).

Para ele, a Criticalidade Auto Organizada se manifesta quando as reações em cadeia que resultam de mudanças na cidade seguem distribuições no tempo e no espaço que ocorrem em todas as escalas, mas seguem leis de potência. E explica que este comportamento é “consequência de processos competitivos sob limite de recursos”.

Medida de Auto similaridade do Sistema Urbano (SIMI)

Visa identificar a existência de alguma proporcionalidade entre os processos de Densificação da Forma Construída e de Expansão do Tecido Urbano, ou, em outras palavras, mensurar a auto similaridade entre as variações de área construída e de área urbanizada. E, tem por objetivo descrever a evolução da alometria entre processos no decorrer da série histórica de dados.

Fundamenta-se em Batty (2005), quando afirma que a cidade possui uma morfologia fractal, a qual define como sendo uma “auto similaridade através de diferentes escalas ou ordens de magnitude”.

Assim, esta medida tem por objetivo verificar se no decorrer do crescimento urbano a relação entre a parte e o todo se mantém, o que demonstraria a auto similaridade do processo, ou seja, a existência de uma dimensão fractal na cidade, que segundo ele é uma das características da criticalidade auto-organizada, além de demonstrar a universalidade do sistema em diferentes momentos.

A densificação da matriz Forma Construída representa a parte do sistema que, no ponto crítico, conduz a expansão da matriz Tecido Urbano, o todo, já que a Forma Construída é parte do Tecido Urbano.

A medida de auto similaridade é calculada em cada tempo de recorrência da série histórica considerada, a partir da equação: $SIMI = \Delta FC / \Delta TU$, onde, ΔFC é a variação da magnitude da Forma Construída e ΔTU é a variação da magnitude do Tecido Urbano.

Apresentados os processos envolvidos no metabolismo do crescimento urbano e as medidas hábeis para a sua descrição e mensuração, passamos a apresentar os procedimentos metodológicos que permitirão esta descrição e mensuração.

Metodologia e estrutura analítica

A abordagem metodológica proposta configura-se pelos procedimentos analíticos a seguir.

Descrição do Sistema Urbano

O sistema urbano será descrito fundamentado em Krafta (2014), que ao sistematizar a morfologia urbana afirma que a sua variedade pode ser associada a um grupo limitado de matrizes: o Espaço Público é o conjunto das vias, o Espaço Privado é o conjunto das quadras que contém os lotes, a Forma Construída é o conjunto das edificações, e o Tecido Urbano é o conjunto que contém os espaços Público e Privado e a Forma Construída.

Definição dos elementos e relações na representação do espaço urbano

Neste trabalho iremos descrever o espaço urbano por unidades morfológicas mínimas, onde:

O Espaço Público será discretizado por trechos de via, ou seja, espaços entre duas interseções. Cada trecho será representado por meio de um vértice.

A interseção entre as vias, ou seja, a conectividade entre os trechos será representada por arestas.

Variáveis

O trabalho será desenvolvido a partir do relacionamento das variáveis Forma Construída e Tecido Urbano, por meio das conectividades do Espaço Público, as quais compõe séries estatísticas.

A variável FC - Forma Construída expressa pela magnitude de área construída nos edifícios, em m².

A variável TU - Tecido Urbano expresso pela magnitude de área territorial urbanizada, em m².

E a variável acessória Adj – Adjacências do Espaço Público.

Indicadores e Análise de dados

Os indicadores constituem-se em relacionamentos entre variáveis com o objetivo de mensurar aspectos relevantes dos processos em estudo e alimentar as análises de evolução, de sensibilidade e de distribuição de ocorrências que produzirão resultados que acreditamos poderem revelar evidências de que a hipótese desta pesquisa é verdadeira. Indicadores e análises são apresentados no quadro abaixo.

Quadro – Estrutura analítica.

Medidas	Variáveis envolvidas	Indicadores	Análise evolutiva	Análise distributiva	Análise evolutiva	Análise de sensibilidade		
DENS	FC _T , TU _T	DENS _T	AeDENS _T			As.EXP	R ² (DENS _T)	
		DENS _p		AdDENS _p				
	DENS _M	AeDENS _M			R ² (DENS _M)			
CENT	FC _p , AdjEP	CENT _T	AeCENT _T					R ² (CENT _T)
		CENT _p		Ad.CENT _p				
		CENT _M	AeCENT _M				R ² (CENT _M)	
EXP	ΔTU _T	EXP _{OCOR}	EXP _{TAM}		Ad.LogEXP _{TAM}			
			EXP _{DUR}		Ad.LogEXP _{DUR}			
SIMI	ΔFC _T , ΔTU _T	SIMI _{FC}			Ae.SIMI _{FC}	As.DF	R ² (SIMI _{FC})	
		SIMI _{DENS}			Ae.SIMI _{DENS}		R ² (SIMI _{DENS})	
		SIMI _{CENT}			Ae.SIMI _{CENT}		R ² (SIMI _{CENT})	
Resultados esperados			Identificação do Ponto Crítico	Determinação da Lei de Potência	Determinação da Dimensão Fractal	Determinação da Sensibilidade das Medidas		
			Descrição da Dinâmica do Metabolismo do Crescimento Urbano					
<p>Legenda:</p> <p><u>Medidas</u></p> <p>DENS – de Densidade</p> <p>CENT – de Centralidade</p> <p>EXP – de Expansão do Tecido Urbano (Avalanches)</p>								

SIMI – de Auto-Similaridade do Metabolismo do Crescimento Urbano

Variáveis

FC_T, FC_P – Variável Forma Construída Total e Variável Forma Construída Parcial;

AdjEP – Variável Adjacências do Espaço Público;

TU_T, TU_P – Variável Tecido Urbano Total e Variável Tecido Urbano Parcial;

$\Delta FC_T, \Delta TU_T$ – Variação das variáveis FC_T e TU_T ;

Indicadores

$DENS_T, DENS_P$ e $DENS_M$ – Indicador de Densidade Total, de Densidade Parcial e de Densidade Máxima;

$CENT_T, CENT_P$ e $CENT_M$ - Indicador de Centralidade Total, de Centralidade Parcial e de Centralidade Máxima;

EXP_{OCOR} - Indicador de Ocorrência de Avalanche;

EXP_{TAM} - Indicador de Tamanho da Avalanche;

EXP_{DUR} - Indicador de Tempo de Duração da Avalanche;

SIMI_{FC} - Indicador de Auto-Similaridade da Forma Construída

SIMI_{DENS} - Indicador de Auto-Similaridade da Densidade

SIMI_{CENT} - Indicador de Auto-Similaridade da Centralidade

Análises

$AeDENS_T, AeDENS_M, AeCENT_T$ e $AeCENT_M$ – A análise da evolução das densidades total e máxima e das centralidades total e máxima permite a identificação dos PCs (expresso por cada indicador) em diversos momentos da série histórica, bem como a evolução do mesmo PC.

$AdDENS_P, Ad.CENT_P, Ad.LogAVAL_{TAM}$, e $Ad.LogAVAL_{DUR}$ – A análise distributiva dos valores de densidade e de centralidade parcial e dos logaritmos dos tamanhos e tempos de duração das avalanches, **para todas as porções de FC do sistema, a cada período de tempo**, permite a Determinação da Lei de Potência.

As.EXP - $R(DENS_T), R(DENS_M), R(CENT_T)$ e $R(CENT_P)$ – A análise das correlações entre as séries de dados de densidade total e máxima e de centralidade total e máxima, cada uma com a variação do tecido urbano (ΔTU) mostra qual indicador ($DENS_T, DENS_P, CENT_T, CENT_P$) descreve melhor a ocorrência da expansão do TU.

Ae.SIMI_{FC}, Ae.SIMI_{DENS} e Ae.SIMI_{CENT} - A análise da evolução do indicador de auto-similaridade entre a FC_T (ΔFC_T), as porções de FC com Densidade máxima e Centralidade máxima e o TU (ΔTU_T),

no decorrer da série temporal, mostra a evolução de uma possível “dimensão fractal” na cidade.

As.DF - $R^2(\text{SIMI}_{FC})$, $R^2(\text{SIMI}_{DENS})$ e $R^2(\text{SIMI}_{CENT})$ - A análise das correlações entre as séries de dados **SIMI_{FC}**, **SIMI_{DENS}** e **SIMI_{CENT}** e a linha reta, mostra qual indicador (FC_T , $DENS_M$, $CENT_M$) determina com mais acurácia a dimensão fractal, e por consequência, a universalidade do sistema em diferentes tempos.

Resultados Esperados

A análise conjunta dos PC, das Leis de Potência, das medidas mais sensíveis e da Dimensão Fractal permite descrever a dinâmica do MCU.

Fonte: elaboração do autor (2016)

Resultados esperados

Identificação do ponto crítico

As análises da evolução da $Ae.DENS_T$ e $Ae.DENS_M$ e da $Ae.CENT_T$ e $Ae.CENT_P$ propiciam a identificação do ponto crítico da referida medida em relação à magnitude do Tecido Urbano.

Os resultados do estudo empírico poderão mostrar situações diversas, poderemos identificar pontos críticos em um, os dois ou em nem um dos indicadores de densidade, a mesma coisa para os de centralidade. Se a identificação de pontos críticos nas medias parciais ocorrer antes das totais, significa que a saturação da forma construída está ocorrendo primeiro em porções da forma construída para depois alcançar o todo. O inverso mostraria que não ocorre saturação parcial da forma construída ou, pelo menos, que a saturação é percebida primeiramente no todo, para depois atingir as partes.

Determinação da Sensibilidade das Medidas na Identificação do ponto crítico

Enquanto a análise da sensibilidade das Medidas (As.MED) propicia a identificação de qual desta quatro medidas ($DENST$, $DENSM$, $CENTT$ e $CENTM$) explica melhor a ocorrência de avalanches.

Com isso, a observação conjunta destas cinco análises pode mostrar um bom panorama em relação a identificação do ponto crítico da Forma Construída em relação ao Tecido Urbano.

Determinação da Lei de Potência

Na sequencia passamos a observação da criticalidade auto-organizada por meio da determinação da Lei de Potência.

A análise da distribuição da $Ad.DENSP$ e da $Ad.CENTP$ nos trechos do sistema significa que, se a função de ajuste mostrar um decaimento do tipo Lei de Potência, pode-se inferir que o comportamento compatível com a dinâmica crítica auto-organizada, levantada por Bak, está presente no sistema urbano. O decaimento do tipo Lei de Potência indicaria a existência de poucas

porções da forma construída com densidades e ou centralidades muito altas e muitas porções da forma construída com densidades e ou centralidades muito baixas, o que mostraria como, segundo Batty, Carvalho, Hudson-Smith, Milton, Smith, e Steadman (2007), a finitude dos recursos contribui para o surgimento e configuração de porções diferenciadas de forma construída e que, conforme Batty (2011), o fato das cidades distribuírem seus recursos no espaço de tal maneira que suas redes de distribuição preenchem de forma eficiente o espaço, fica, por meio da auto similaridade, manifesto na definição da ordem hierárquica das cidades.

Ainda, análise semelhante pode ser feita com as análises da distribuição dos Ad.LogAVALTAM e dos Ad.LogAVALDUR, as quais propiciam, se a equação de regressão de potência mostrar um decaimento do tipo Lei de Potência, inferir-se que a porção do sistema urbano relativa ao tecido urbano possui criticalidade auto-organizada. Neste caso a presença da criticalidade auto-organizada poderia indicar, também, uma eficiência na distribuição dos recursos investidos no crescimento do tecido urbano.

A análise simultânea da presença de criticalidade auto-organizada em cada uma das matrizes pode indicar a presença de criticalidade auto-organizada no sistema urbano como um todo.

Determinação da Dimensão Fractal

As análises de evolução da auto similaridade Ae.SIMIFC, Ae.SIMIDENS e Ae.SIMICENT proporcionam a demonstração da possível existência de uma dimensão fractal na cidade, entre a Forma Construída e o Tecido Urbano. Uma medida de dimensão fractal entre as razões das magnitudes da densidade e da expansão, como já foi explanado, pode indicar a universalidade do sistema nos diferentes tempos, além de ser mais um indício da presença da criticalidade auto-organizada.

Neste caso, a existência de uma dimensão fractal que se repete, ou seja, um padrão de proporcionalidade constante entre as magnitudes da Forma Construída e do Tecido Urbano corrobora na demonstração da existência de um padrão alométrico entre as matrizes do sistema.

Determinação da Sensibilidade das Medidas na determinação da dimensão fractal

Análise de Sensibilidade das Medidas de determinação da Dimensão Fractal - As.DF - permite determinar qual dos indicadores de similaridade (Indicador de Auto similaridade da Forma Construída - SIMIFC, Indicador de Auto similaridade da Densidade- SIMIDENS e - Indicador de Auto similaridade da Centralidade - SIMICENT) consegue determinar de forma mais acurada a dimensão fractal do sistema urbano e, conseqüentemente, melhor demonstra a universalidade do sistema nos diferentes tempos.

Descrição da Dinâmica do Metabolismo do Crescimento Urbano

Até aqui expressamos algumas possibilidades interpretativas quando as diversas análises são observadas separadamente. A possibilidade de cruzamentos entre seus resultados pode mostrar muitos outros aspectos relativos às flutuações do sistema, inerentes a dinâmica do crescimento urbano, como por exemplo:

- a razão de crescimento da densidade e de centralidade é contínua durante o ciclo de crescimento (espaço entre dois atingimento do ponto crítico) ou se ela se eleva perto do ápice;
- os efeitos espaciais e temporais das avalanches são proporcionais a taxa de variação da densidade e da centralidade;
- logo após o atingimento do ponto crítico ocorre um período de estagnação nas variáveis densidade e centralidade, ou elas já iniciam com crescimento;
- o tempo que o sistema leva para se recuperar, após o atingimento do ponto crítico, guarda alguma relação com o espaço temporal entre dois pontos críticos.

E, certamente, muitos outros aspectos e constatações surgirão no decorrer da análise do estudo empírico, os quais poderão servir para comprovar a hipótese desta pesquisa ou, simplesmente, derrubá-la.

Estudo empírico

Os procedimentos metodológicos apresentados serão testados em um sistema urbano real, observando as etapas a seguir: seleção da amostra – sistema urbano real; obtenção dos dados; organização de planilhas da evolução da Área Construída e da Área Urbanizada no maior período de tempo possível; cálculo dos indicadores propostos e das relações entre as variáveis cada vez que porções de novas áreas urbanizadas são adicionadas; análise das ocorrências e identificação de um ponto crítico; teste de diferentes medidas configuracionais, inicialmente a Centralidade, para ver se um ponto crítico aparece; verificação das estatísticas das avalanches, por meio dos histogramas de frequência das medidas de centralidade, para ver se eles revelam aspectos sobre os estados de criticidade do sistema; análise do surgimento de pontos críticos e de aspectos da criticidade do sistema para a verificação de pertinência das variáveis e hipóteses propostas.

REFERÊNCIAS

- Allen, P. M., 1998. *Cities and Regions as Self-Organizing Systems: Models of Complexity*. Taylor and Francis, London.
- Allen, A., 2011. Interview conducted on 15/11/2011, London. In *Urban Metabolism at UCL – A working paper*. Broto, V.C.; Allen, A. e Eriksson A. UCL Environment Institute Development and Planning Unit UCL. London.
- Bak, P.; Tang, C.; Wiesenfeld, K., 1988. Self-organized criticality. Volume 38 número 1, July 1, 1988, *Physical Review A*, Department of Physics, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York. Pag. 364 – 374.
- Batty, M. & Torrens, P. M., 2001. *Modeling Complexity: The limits to prediction*. <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper36.pdf>. October
- Batty, M., 2005. *Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. ISBN 0-262-02583-3. Cambridge, MA: The MIT Press. 565 páginas.

- Batty, M.; Carvalho, R.; Hudson-Smith, A.; Milton, R.; Smith, D. E Steadman, P., 2007. Scaling and Allometry in the Building Geometries of Greater London. Working papers series, Paper 126, Centre for Advanced Spatial Analysis, and Bartlett Graduate School, University College London, 1-19 Torrington Place, London WC1E 6BT. ISSN 1467-1298.
- Batty, M. Interview conducted on 28/07/2011. In Urban Metabolism at UCL – A working paper. Broto, V.C.; Allen, A. e Eriksson A. UCL Environment Institute Development and Planning Unit UCL. London.
- Broto, V.C.; Allen, A. E Eriksson A., 2011. In Urban Metabolism at UCL – A working paper. UCL Environment Institute Development and Planning Unit UCL. London.
- Carneiro, M.V. & Charret, I. C. 2005. A Criticalidade Auto Organizada na Pilha de Areia. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 4, p. 571 - 576.
- Cohen, T., 2011. Interviewed on 13/07/2011, London. In Urban Metabolism at UCL – A working paper. Broto, V.C.; Allen, A. e Eriksson A. UCL Environment Institute Development and Planning Unit UCL. London.
- Krafta, R. & Netto, V., 2009. A Forma Urbana Como Problema De Desempenho - o impacto de propriedades espaciais sobre o comportamento urbano. In Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, Vol.11, Nº2.
- Krafta, R. & Netto, V., 2011. Urban Form as a Problem of Performance: from indicators of urban features to systemic indicators of actual performance. Porto Alegre.
- Krafta, R. 2014. Notas de aula de Morfologia Urbana. ISBN 978-85-386-0227-9. Editora da UFRGS. Porto Alegre. 352 páginas.
- Krüger, M. J. (1996): Definição de Morfologia Urbana. Departamento de arquitetura, Universidade de Coimbra (texto apresentado no curso “Morfologia Urbana” – PROPUR/UFRGS).
- Pont, M.B. & Haupt, P., 2009. Space, density and urban form. ISBN 978-90-5269-375-0. Netherlands. 303 páginas.
- Salat, S. & Bourdic, L., 2012. Systemic resilience of complex urban systems - on trees and leaves. In Journal of Land Use, Mobility and Environment TeMA 2 (2012) 55-68 print ISSN 1970-9889, e- ISSN 1970-9870 DOI: 10.6092/1970-9870/918.
- Salat, S.; Bourdic, L.; Labbe, F., 2014. Breaking symmetries and emerging scaling urban structures. A Morphological Tale of 3 Cities: Paris, New York and Barcelona. International Journal of Architectural Research, Volume 8 - Issue 2 - Regular Section. Paris, France. Páginas 77 a 93.
- Tyler, N., 2011. Interview conducted on 11/07/2011. In Urban Metabolism at UCL – A working paper. Broto, V.C.; Allen, A. e Eriksson A. UCL Environment Institute Development and Planning Unit UCL. London.
- West, G. 2010. Palestra sobre as regras de escala.