

# A COMPLEXIDADE EM GEOGRAFIA

JORGE ROCHA<sup>1</sup>  
PAULO MORGADO SOUSA<sup>1</sup>

## I. INTRODUÇÃO

Muitos de nós, nas suas infâncias, sucumbimos à curiosidade, achando que valia o risco de apanharmos umas palmadas correctivas, e desmontámos o brinquedo novo que tínhamos acabado de receber, só para tentar perceber como aquelas peças se encaixavam umas-nas-outras e de forma articulada permitiam ao brinquedo funcionar? Pois é, apesar de haver alguns menos confessos, a verdade é que passados todos estes anos, continuamos a proceder tal e qual, na busca da compreensão e da verdade escondida nas coisas, ie continuamos a desmontar o universo em sistemas, sub-sistemas, moléculas, átomos e ainda assim, sem ter descoberto a verdade das coisas. Esta teoria reducionista, que afirmava que para se compreender a natureza das coisas, tínhamos primeiro de compreender as suas componentes, e que tem prevalecido até meados do século XX, está esgotada. Durante anos tentámos ver o mundo na perspectiva das suas componentes, para depois constatarmos que a realidade é bem mais complexa e que as leis entretanto declaradas não eram universais. Não obstante, avanços foram feitos e se não bastassem os muitos fundamentos teóricos que continuam a prevalecer, só o facto dos cientistas perceberem que a teoria reducionista os levava constantemente a esbarrar com o insolúvel problema da complexidade (a complexidade da natureza), era já suficiente pelo interesse que levantou e nas investigações que instigou.

Precisamente, nos sistemas complexos as componentes não explicam o todo, e independentemente delas se poderem articular de maneiras tão diversas, que seria impossível para nós dissecarmo-las todas, a natureza consegue-o com uma precisão cirúrgica e uma beleza incomparável. Como? Os cientistas avançaram com a tese da lei da auto-organização, mas continuam sem a conseguir compreender. A procura de respostas, para esta e outras perguntas são o motivo que fez redireccionar atenção dos cientistas neste final do século XX e daí em diante.

Atentos aos acontecimentos e aos avanços teóricos feitos na ciência, alguns geógrafos, com maior afinidade com a Geografia teórica e quantitativa, viram aqui uma oportunidade de poder encontrar algumas respostas para sistemas que sempre souberam ser complexos e foram alvo dos seus estudos eg. as cidades e as regiões (Wilson, 1970; Batty, 2005), a análise urbana e regional (Wilson, 2000), o uso e ocupação do solo (Tenedório, 2006), as redes (Kansky, 1963), apenas para nomear alguns.

Mediante a inclusão dos elementos escala e espaço nas metodologias e teorias avançadas por físicos e matemáticos, em conjunto com as potencialidades computacionais providenciadas pelos avanços tecnológicos, particularmente sentidos na última década do século XX, e o sucesso dos SIG iniciados por Roger Tomlinson, nos anos 1960, a construção de modelos geográficos tem sido o método elegido pelos geógrafos deste século XXI, para encontrar respostas para antigos problemas que prevalecem e se agudizam no panorama actual da globalização (sociedade em rede, competitividade das cidades, fragmentação das cidades, descaracterização das paisagens e aniquilação do património natural e cultural, etc.) bem como para aperfeiçoar modelos que haviam perdido a sua utilidade, pela dificuldade que tiveram em incorporar elementos e em trabalhá-los (teoria dos lugares centrais, modelo gravítico).

---

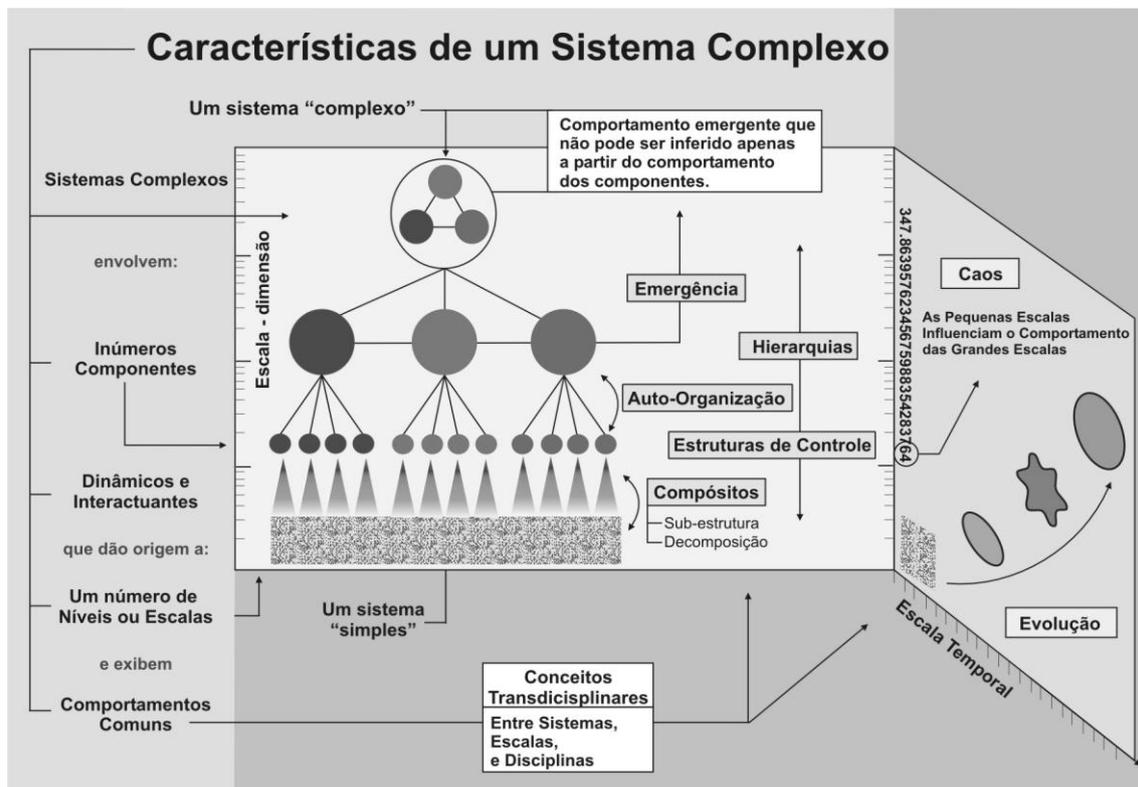
<sup>1</sup> Centro de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras – Universidade de Lisboa  
*Alameda da Universidade, 1600–214 Lisboa Tel: (+ 351) 21 794 02 18* E-mail: jrocha@fl.ul.pt; pms@fl.ul.pt.

O trabalho aqui apresentado não é mais que um olhar, forçosamente sintético e porventura até superficial, sobre os modelos de análise dos sistemas complexos pela Geografia, focando a nossa atenção sobretudo nas tendências evidenciadas nas últimas décadas do século XX e início do século XXI, mas sem deixar de sublinhar os fundamentos teóricos dos modelos clássicos. Definida esta matéria como central ao artigo, decidimos desenhar uma estrutura em três partes: a primeira parte, de cariz analítica e descritiva trata de apresentar quais as origens, evolução e componentes dos sistemas complexos, assim como da sua integração e aplicação no domínio da Geografia. Finalmente, a segunda parte deste artigo recai nas considerações finais às tendências da modelação em Geografia.

## II. SOBRE OS SISTEMAS COMPLEXOS

Um sistema complexo (fig.1) é pois, qualquer um que envolva determinado número de elementos, organizados em estruturas que podem existir em diversas escalas. Estes sistemas passam por processos de transformação que não são passíveis de ser descritos por uma única regra, ou seja, não podem ser reduzidos a um único nível de explanação. Segundo Batty e Torrens (2005) podemos encarar um sistema complexo como uma entidade, coerente de uma forma reconhecida mas cujos elementos, interações e dinâmicas, geram estruturas e admitem o elemento surpresa e novidade, o qual não pode ser definido *a priori*. Os sistemas complexos são muito mais que a soma das suas partes e, conseqüentemente, qualquer tentativa de modelar a sua estrutura é necessariamente parcial e incompleta. Assim, os modelos representam simplificações, em que os processos essenciais são simulados, o que nos leva a concluir que em cada sistema existem muitos modelos.

Fig. 1 – Características de um Sistema Complexo



Fonte: Tenedório et al, 2006

Enquanto que o conceito de complexidade em si não é novo, a aplicação deste conceito a processos socioeconómicos é um fenómeno relativamente recente. Os defensores da teoria da complexidade vêem-na como uma forma de simplificar significativamente os sistemas complexos. Muitas vezes, a complexidade resulta de interacções não lineares entre as componentes dos sistemas complexos, as quais normalmente conduzem a propriedades emergentes, a dinâmicas inesperadas e a que as características da auto-organização se transformem nas propriedades básicas dos sistemas complexos. Assim, a própria complexidade pode muitas vezes ser expressa por um importante conjunto de características: i) auto organização; ii) não linearidade; iii) dinâmica ordem/caos e iv) propriedades emergentes. Hoje, a compreensão científica tem de centrar-se na teoria da complexidade e na multidisciplinaridade e ultrapassar a teoria do reducionismo.

## **1. Auto-organização**

A auto-organização é definida como a emergência espontânea de estruturas macroscópicas organizadas em desequilíbrio, devido às interacções colectivas entre um elevado número de objectos microscópicos à medida que reagem e se adaptam ao meio ambiente. Esta ideia implica que os sistemas se organizam a eles próprios de dentro para fora; logo as estruturas não são impostas a partir do exterior, ou seja, a organização deve-se puramente a dinâmicas internas ao invés de alguma força externa. Num sistema auto organizado (SAO), as acções e interacções locais dos indivíduos são a fonte da organização, num nível superior, do sistema em estruturas organizadas em padrões de dinâmicas reconhecidas. Na base da compreensão destes sistemas está a subtil diferença entre os seus componentes e das interacções entre eles. A dinâmica de um sistema não pode ser entendida através da decomposição do sistema nas suas partes constituintes. A teoria da auto-organização sugere que interacções locais insignificantes podem, eventualmente, conduzir a uma estrutura global qualitativamente diferente (Wu, 1998; Batty, 1995), a qual constitui a base da teoria dos autómatos celulares (AC) e dos multi agentes (MA).

A sinérgica, um ramo da teoria da auto-organização tenta entender as sinergias, ou seja os relacionamentos explícitos entre o comportamento dos indivíduos (nível micro) e os padrões envolventes (nível macro). Esta abordagem é baseada em conceitos como os parâmetros de ordem, que tipicamente representam os padrões macroscópicos, e o designado “princípio de escravatura” que traduz a relação com as estruturas microscópicas (Daffertshofer et al., 2001). O primeiro objectivo da sinérgica é compreender como a emergência de um sistema macroscópico, caracterizado por um elevado grau de organização (ordem), pode ser explicado pelos comportamentos microscópicos (Tannier e Frankhauser, 2001). Haken e Portugali (1995) utilizaram uma abordagem sinérgica para explicar a auto-organização do sistema urbano, baseada no reconhecimento de padrões, dentro dos quais a interligação entre o padrão cognitivo e o padrão dos materiais foi conceptualizado e, conseqüentemente, analisado.

## **2. Não linearidade**

Os termos linear e não-linear são muitas vezes associados a simplicidade e dificuldade. A linearidade é uma propriedade das linhas rectas, de proporções simples, previsíveis e “bem comportadas”. Por outro lado, a não linearidade aplica-se a sistemas que fazem coisas imprevisíveis, que não podem ser resolvidas com exactidão e, portanto, têm que ser aproximadas: as externalidades que não encaixam no padrão definido. Mas, no fundo, exactamente que sistemas são não lineares? Bem, na realidade quase todos.

Aproximadamente toda a actual ciência baseia-se no conceito linear, ou seja o resultado da equação varia de forma directamente proporcional aos valores de entrada  $y=f(x)$ . Esta situação é tida como natural e por vezes assume-se que o Mundo realmente funciona assim; uma

bola chutada com o dobro da força adquire o dobro da velocidade ou um buraco com o dobro do tamanho leva o dobro da água. Se isto não fosse verdade então como seria possível prever alguma coisa? Para surpresa de muitos o estado natural do Mundo é não linear, a linearidade é apenas uma aproximação.

As mudanças nos sistemas complexos, quando ocorrem, dão-se de uma forma não-linear. Uma alteração linear só existe, quando ocorre uma sequência de acontecimentos que se afectam uns aos outros pela ordem em que aparecem. Opostamente, na mudança não-linear é possível observar um elemento a alterar os elementos que se encontram sequencialmente antes dele. Mais, na análise não-linear observa-se como todos os elementos da sequência podem afectar os restantes, quer se encontrem antes ou depois, o que muitas vezes conduz a resultados desproporcionados relativamente aos dados de entrada. Este tipo de dinâmica, inserida num sistema complexo, é muito mais próxima da forma como a natureza realmente funciona. Raramente ocorre na natureza uma sequência puramente linear de acontecimentos e alterações.

Complementarmente, em grandes sistemas complexos, as relações não-lineares intra e inter-escala, e respectivo retorno, entre todos os componentes, conduzem normalmente à instabilidade e imprevisibilidade. Este fenómeno é conhecido como a sensibilidade às condições iniciais, ou ‘efeito borboleta’ e ocorre porque os resultados acumulados de cada interacção não são simplesmente adicionados ao sistema (como a análise linear assume), mas aumentam exponencialmente à medida que o sistema diverge do estado inicial para um, imprevisível, estado longe do estimado. Este comportamento é responsável pelo que entendemos como Caos, que em termos grosseiros pode ser definido como o equivalente ao acaso ou casualidade/aleatoriedade.

### **3. Dinâmica ordem/caos**

É normal e relativamente fácil prever o que vai acontecer na fase seguinte do desenvolvimento de um sistema, quando se conhece extensivamente a fase anterior. Este conhecimento constitui, regra geral o conjunto de possibilidades para onde o sistema pode evoluir. Mas, quando se começa a avaliar as fases de desenvolvimento que se encontram sequencialmente mais distantes, torna-se cada vez mais difícil prever como o sistema vai evoluir tendo como base o conhecimento da primeira fase, mesmo quando ele é extensivo. Mesmo quando, aparentemente, existe um desenvolvimento lógico de fase para fase, sobrevém uma crescente inabilidade para prever qual será realmente o próximo desenvolvimento. Esta incerteza na previsão é designada de Caos.

Assim, uma pequena alteração nas condições do sistema pode, eventualmente, conduzir a um enorme conjunto de possíveis resultados. No entanto, todas essas alterações continuam a ser resultados dessa pequena alteração, apenas se torna mais difícil prever exactamente qual das possibilidades irá efectivamente ocorrer. Mas, como algumas probabilidades de ocorrência podem ser conhecidas, a análise estatística ainda é muito importante para ajudar a descrever a situação global. A ilustração clássica desta situação é a ideia de que o bater de asas de uma borboleta num extremo do mundo pode contribuir para a formação de um furacão no pólo oposto.

Para controlar os sistemas não-lineares é necessário compreender as circunstâncias em que se tornam caóticos. De alguma forma já se tentava fazê-lo através das aproximações lineares, pois as previsões apenas eram realizadas em regiões onde o sistema se comportava quase linearmente. Isto significa restringir os parâmetros do sistema a áreas que não são sensíveis às condições iniciais ou estudar apenas aspectos simplificados dos sistemas. Infelizmente, quando se lida com sistemas complexos esta opção raramente existe. O forte retorno (positivo ou negativo) e as várias interacções significam que, potencialmente, o comportamento caótico poderá surgir a qualquer momento, podendo adquirir contornos desastrosos se for inesperado. Para compreender o que poderá acontecer a longo prazo é necessário encontrar uma forma de controlar o Caos.

Os sistemas caóticos não funcionam totalmente ao acaso, normalmente possuem limites bem definidos (trajetórias no espaço), de forma que numa primeira aproximação é possível

definir limites para o sistema. Com recurso à análise estatística é possível (tal como na análise quântica) atribuir uma probabilidade de o sistema se encontrar em determinado estado (efectivamente dentro de uma pequena região do espaço). Tem-se observado, que pequenas alterações podem lançar os sistemas caóticos para diversos estados diferentes, mas é possível perturbar o sistema de forma controlada, garantindo que ele se mantém nos parâmetros comportamentais desejados. Como é que a ordem emerge da desordem? A esta pergunta, que lançou a investigação dos sistemas complexos para lá dos ‘muros’ da física e da matemática, para as ciências sociais e Humanas, e que depôs fatalmente a teoria reducionista, os cientistas criaram a explicação do ponto crítico ou fase de transição (Barabási, 2003). Uma abordagem semelhante é a de adicionar constrangimentos tendo em vista alterar a dinâmica global, até que todos os estados evolutivos passíveis de ocorrer se enquadrem dentro das fronteiras desejadas. Um dos principais motivos de interesse dentro da teoria dos sistemas complexos é avaliar em que circunstâncias a ordem, ou a desordem (caos), podem resultar das interações ao acaso dos multi-agentes.

#### **4. Propriedades emergentes**

A imprevisibilidade inerente à evolução dos sistemas complexos pode originar resultados totalmente inesperados face às condições iniciais. Estes resultados imprevisíveis são designados de propriedades emergentes e demonstram que os sistemas complexos são intrinsecamente criativos. As propriedades emergentes continuam a ser um resultado lógico e não um resultado previsível, mesmo nos fenómenos de nível superior que não podem ser reduzidos aos seus mais simples constituintes ou às suas origens.

Efectivamente, a emergência vista como um fenómeno segundo o qual comportamentos de alto nível hierárquico fluem naturalmente de interações de baixo nível, implica que o comportamento de uma pequena parte difere com o contexto, ou seja difere se ela estiver isolada ou se fizer parte de um sistema maior. Esta observação originou uma designação muito aplicada aos sistemas complexos que é “o todo é maior que a soma das partes” ou, que um pequeno grupo de elementos pode justificar a maioria das acções, ou ainda mais simplesmente ‘muito vindo de pouco’. Assim, o comportamento colectivo de um sistema complexo está dependente do comportamento de todas as suas partes. Por exemplo, Portugali e Benenson (1997) mostraram a emergência de diferentes formas de segregação económica e cultural, como consequência da interacção entre os indivíduos e o ambiente urbano ao nível local e global.

Neste contexto é importante ter em conta que a emergência auto organizada é um processo hierárquico. Desta forma, um sistema complexo constitui um conjunto de subsistemas interrelacionados, que por sua vez são constituídos por outros subsistemas e assim sucessivamente, até alcançar o nível do componente elementar (Kronert e tal., 2001). A teoria hierárquica aplica a hierarquia para organizar conceitos e interpretar diversas complexidades. Esta teoria analisa exhaustivamente as questões da escala, níveis de organização, níveis de observação e níveis de explanação, num sistema complexo caracterizado por estruturas hierárquicas e interações entre níveis. Mais, sugere que quando um fenómeno é estudado num nível hierárquico particular (o nível focal, normalmente designado de nível zero) a sua compreensão vem do nível inferior (-1), enquanto que a significância desse fenómeno apenas pode ser relevante para o nível superior (+1) (Kronert et al., 2001).

A chave para a compreensão da estrutura hierárquica é a escala. A escala é o conceito central para descrever e explicar a organização hierárquica complexa do mundo geográfico (Marceau, 1999). Num sistema hierárquico, os níveis superiores (de menor escala) definem restrições para os níveis inferiores, os quais mutuam de forma demasiadamente célere para constituírem um foco de interesse, podendo ser ignorados.

### III.A MODELAÇÃO EM GEOGRAFIA

“todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis”  
George Box

A construção de um modelo geográfico consiste numa representação sintetizada de conhecimentos sobre o mundo conhecido. Essa construção parte da geo-referenciação de determinado conjunto de entidades e dos descritores de uma realidade, tão completos e precisos quanto possível, para chegar a novos conhecimentos. (Morgado; 2002: 83) Por outras palavras, os modelos permitem aos cientistas focarem a sua atenção sobre aquilo que eles pensam ser a matéria-prima, face ao problema em causa, e despistar o ‘ruído’. Nesta perspectiva, é justo declarar que os modelos têm uma carga subjectiva inerente, na medida que não são a realidade (são porções dela), e que podem ser abordados e concebidos de variadas perspectivas e de múltiplas formas. Logo, os modelos são imperfeitos. Não obstante, essa imperfeição pode ser minorada de diversas maneiras: observando e analisando o comportamento transformativo dos fenómenos em estudo; estudando os modelos e estudos já realizados e confrontando os seus resultados com as observações actuais; tendo uma equipa multidisciplinar; mudando de escala; aplicando o modelo noutras realidades e tentando classificar os diferentes tipos de modelos e percebê-los. (Haggett e Chorley, 1969; Haggett, 2001; Potrykowski e Taylor, 1982).

Os sistemas geográficos são, por natureza, problemas de complexidade organizada, que demasiadas vezes, foram inapropriadamente modelados como problemas de simplicidade (Física) ou de complexidade desorganizada (generalização estatística) (Jacobs, 1961). Os recentes avanços na capacidade de processamento dos computadores e nas técnicas de modelação computacional forneceram, finalmente, os meios para modelar e compreender estes problemas mais difíceis de complexidade organizada (Openshaw, 1995). No entanto, o poder de processamento para desenvolver esses modelos à muito que extravasou o nosso conhecimento do seu uso mais efectivo. Existe uma profunda necessidade de teoria, a qual fornece o mapa que transforma um conjunto descoordenado de experiências, ou simulações computacionais, numa exploração cumulativa (Booker, Goldberg e Holland, 1989).

Actualmente, estão desenvolvidos e em aplicação inúmeros modelos, disseminados pelos mais variados ramos da ciência. No entanto, quase todos têm sido alvos de fortes críticas. Esta situação pode preconizar que a maioria dos objectos que são alvo de modelação não são conceptualmente bem compreendidos. Olhando através da história da modelação, torna-se bastante claro que os seus progressos estão intimamente ligados aos avanços noutras áreas como a matemática, a física e a informática. Estes mesmos progressos tinham à relativamente pouco tempo feito emergir a Geografia quantitativa (Wegener, 2001). A emergência, nos anos 40, das “antigas três teorias sistémicas” (teoria sistémica geral, teoria da informação e cibernética) e das técnicas computacionais originou a primeira revolução na modelação, baseada em equações lineares mas ainda não espacialmente explícita.

Contudo, é inegável que a desmedida evolução da Detecção Remota, da Ciência de Informação Geográfica e das teorias sistémicas, com especial incidência no desenvolvimento das teorias não lineares e da complexidade, gerou um novo impulso de desenvolvimento na modelação. Três razões sustentam esta metamorfose: i) a teoria da complexidade criou a expectativa de se poder re-compreender os sistemas ou fenómenos estudados (Wu e David, 2002); ii) os novos métodos matemáticos viabilizaram novas formas de representar e quantificar a complexidade; iii) a Detecção Remota e os Sistemas de Informação Geográfica garantiram a disponibilidade de dados em diversas escalas espacio-temporais.

Aludindo ao facto, muitos teóricos têm ao longo da história formulado teses e desenvolvido estudos e conhecimentos, assim como métodos e técnicas visando a racionalização do espaço e a conjugação dos sistemas que o compõem. Para levar a efeito a tarefa, e porque é impossível abarcar o todo, impôs-se desde sempre a necessidade de se formularem experiências sobre partes da realidade, na tentativa de perceber o conjunto, ie.

conceber modelos capazes de representar, simular e criar cenários da realidade, tal como Peter Haggett afirma: “A model is an idealized representation of the real world built in order to demonstrate certain of its properties. (...) Models are made necessary by the complexity of reality. They are a prop to our understanding and a source of working hypotheses for research. They convey not the whole truth, but a useful and apparently comprehensible part of it.” (2001:22).

Em suma, e sobre a modelação de sistemas complexos em Geografia, é pertinente concluir-se que o recurso aos modelos como forma de analisar, compreender, representar e explicar a natureza das interacções e dinâmicas dos fenómenos decorrentes sobre o espaço geográfico, continua hoje tão fundamental, quanto o foram os modelos matemáticos iniciados na década de 1960. (Wilson, 2000:60)

Precisamente, esta conclusão remete-nos para uma nova fase da Geografia, que embora ainda não bem definida conceptualmente na régua da história fragmentada da Geografia moderna (Haggett, P., 2001:25), está já fortemente radicada, quer a nível profissional, quer a nível académico, com destaque ao nível do ensino no seio das Ciências geográficas: A Geocomputação.

## **1. A Modelação da complexidade em Geografia: A Geocomputação**

A Geocomputação é a legítima descendente da “Nova Geografia” ou da Geografia teórica e quantitativa<sup>2</sup> e dos seus percursos da década de 60. A este título muitos autores tem expressado a sua opinião reconhecendo que existe um renovado interesse, nem que seja apenas curiosidade, pela análise espacial quantitativa no seio da Geografia, independentemente de muitos deles ainda não conseguirem precisar, quer a causa, quer o forma ie. o que é realmente esta (re)aparecida nova geografia. Alguns apelidam de SIG - uma confusão típica inicial e dos que desconhecem a espessura dum e doutro -; outros referem-se-lhe como CIG - embora mais compreensível, não deixa de ser uma imprecisão conceptual, já que por CIG entendemos a teoria e os conceitos que estão por detrás dos SIG (Goodchild, 1997) -, outros ainda foram inventado ou adaptando outros conceitos, como geoprocessamento ou geomática. A esta profícuca imaginação para se inventarem termos e acrónimos, duas razões podem ser apontadas, e que de resto são as mesmas que se podem encontrar quando nos debruçamos sobre os conceitos que definem os SIG:

- 1) o facto de ser multidisciplinar e de assistir à convergência de saberes de vários domínios científicos;
- 2) a sua relativa juventude, em contraponto com a sua abrangente difusão e interesse por parte, quer da sociedade, quer da academia.

Em síntese, e conforme (Fotheringham, Brunson e Charlton, 2000) colocaram, apesar da geografia teórica e quantitativa ser considerada, por parte daqueles que estão de fora, como uma área estática de estudo, a verdade é que tem-se verificado na última década um crescente e renovado interesse, não apenas metodológico e tecnológico, que obviamente está implícito e é importante, mas também de base intelectual e formal, que reflecte as mudanças filosóficas na abordagem que os SIG e a Detecção Remota vieram trazer para a geografia teórica e quantitativa.

Efectivamente, após esgotada a capacidade de aquisição, armazenamento e gestão de informação de base geográfica, com o intuito de ‘colorir mapas’, ou tendo ido mais além e desenvolvido algoritmia de análise espacial, geostatística e análise a 3D, não havia muito mais por onde evoluir, que não a geocomputação. Em suma, trata-se de um processo racional e lógico, com o intuito de dar sentido e uso ao considerável volume de informação geo-

---

<sup>2</sup> Diz-se teórica e quantitativa porque é uma teoria construída a partir de métricas eg. repetidos processos, observações, hipóteses, modelos, validação e calibração até à re-formulação de princípios e ao re-início de todo o processo, para testar novas hipóteses.

referenciada armazenada, e explorar a capacidade de resolução de problemas reais mediante uma combinação híbrida de métodos, ciências e tecnologias, como a estatística, a física, a matemática e a informática computacional.

Não obstante, e a título de clarificação, atentemos a algumas das definições que foram surgindo sobre Geocomputação, por parte de algumas das mais conceituadas instituições e entidades a trabalharem e investigarem sobre a disciplina:

- “GeoComputation which attempts to integrate the quantitative geography and spatial visualization technology, has been very popular among GIS communities since the beginning of the 1990s.” (Hisaji e Murayama, 2003:1)

- Geocomputation aims to "enrich geography with a toolbox of methods to model and analyze a range of highly complex, often non-deterministic problems" (Gahegan, 1999)

O estudo dos sistemas complexos - caracterizados essencialmente pela emergência, a auto-organização, a auto-similaridade, as relações não lineares e as redes de relações hierárquicas - recorre à lógica dialéctica e exige métodos mais avançados com forte incorporação da geocomputação e, conseqüentemente, da ciência de informação geográfica. As abordagens computacionais em geografia usadas para demonstrar, simular, analisar e modelar estas características dos sistemas complexos são várias: i) autómatos celulares; ii) multi-agentes; iii) estatística espacial (geoestatística); iv) redes neuronais artificiais; v) fractais; vi) algoritmos genéticos; vii) sistemas caóticos e catastróficos; viii) a teoria das redes e dos grafos, entre outros. Em jeito de síntese, entendemos por Geocomputação toda e qualquer análise quantitativa feita com informação georreferenciada, e mediante o uso da computação.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos registou-se um acréscimo na disseminação das metodologias de análise espacial com base em suporte informático, dando origem a uma nova área de conhecimento, que combina abordagens recorrentes dos Sistemas de Informação Geográfica com outras emergentes (com principal incidência no seio da inteligência artificial) como os algoritmos genéticos – Autómatos Celulares, os sistemas periciais - pesquisas heurísticas e lógica de predicados, análise de dados com incerteza (*fuzzy*) e Redes Neuronais.

Da premente necessidade de catalogar esta nova área interdisciplinar, para que não fosse classificada como uma simples extensão das técnicas estatísticas para análise de dados espaciais, nasceu a designação geocomputação. Proposta por Stan Openshaw, esta designação tem granjeado uma crescente aceitação no meio, visto permitir enquadrar no seio das tecnologias de informação geográfica, um certo tipo de investigação aplicada que recorre aos SIG como ferramenta, mas que, simultaneamente, se afasta das soluções comerciais.

Este termo descreve o uso de métodos que recorrem intensivamente a computadores tendo em vista a perscrutação de conhecimento em geografia, com especial destaque para aqueles que utilizam formas de *clustering* não convencionais e/ou técnicas de análise. Ultimamente, esta definição enquadrou-se num contexto bastante mais lato, que envolve a análise espacial, a modelação dinâmica e a visualização da dinâmica espaço-tempo. Efectivamente, a geocomputação enquadra-se num conjunto de modelos e métodos computacionais desvelados à solução de problemas geográficos de grande complexidade. Não se está face a uma simples utilização do computador como ferramenta, como era proposto nos primórdios, mas sim perante o reconhecimento de que o computador já não faz parte dos meios de pesquisa, é sim – ele próprio - o meio (ambiente) da pesquisa.

Mas, quais são as motivações que incentivam a investigação no domínio da geocomputação? Existem três razões principais para a difusão desta “nova” Ciência de Informação Geográfica: A primeira prende-se com o grande volume de informação que

actualmente se encontra disponível e, principalmente, com a sua facilidade de circulação; a segunda materializa-se de duas formas: a emergência da tecnologia SIG e um conjunto de técnicas decorrentes da algorítmica, como as redes neuronais, os autómatos celulares e os sistemas multi-agente; Por fim, a terceira, relaciona-se com os processos de análise espacial baseados em estatísticas espaciais, os quais têm sido um tópico fundamental da investigação geográfica nas últimas décadas.

Assim, é válido reiterar que modelação dinâmica da complexidade constitui um desafio eminente para a próxima geração de SIG. Os métodos para a modelação de sistemas abertos, os quais vêm de encontro a inúmeras necessidades actuais para modelar processos dinâmicos de maneira rápida e eficiente, raramente são implementados em SIG. Como consequência, os SIG permanecem ainda com um papel restrito na predição e privados de recursos de simulação e modelação relevantes no mundo moderno. Deste modo, pode-se afirmar que na maioria dos casos os paradigmas de representação do conhecimento ainda são essencialmente estáticos, sem modelar adequadamente a dimensão temporal e os relacionamentos dinâmicos e dependentes de contexto entre os objectos.

Concluindo, é importante salientar que a integração entre modelos dinâmicos e Sistemas de Informações Geográficas deve ser entendida como uma relação simbiótica e não como mera subjugação de modelos aos referidos sistemas. Neste sentido, podemos apresentar três fortes razões para esta integração. Primeiro, o facto de que a representação espacial é crítica para a (re)solução de problemas complexos, porém os SIG carecem de recursos preditivos e analíticos para lidar com problemas complexos. Segundo, as ferramentas de modelação não dispõem de componentes analíticos espaciais suficientemente flexíveis, como aqueles encontrados em SIG, e são frequentemente inacessíveis aos “não-especialistas”. Terceiro, e mais importante, a modelação e os SIG podem ambos adquirir maior robustez através da mútua cooperação e co-evolução.

## BIBLIOGRAFIA

- Barabási A-L (2003) *Linked. How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. Plume, New York.
- Batty M, Xie Y (1994) From Cells to Cities. *Environment and Planning B*, 21: 531-548.
- Batty *et al*, (1999) Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computer, Environment and Urban Systems*, 23: 205-233.
- Batty M (1995) New ways of looking at cities. *Nature*, 377: 574.
- Batty M (1998) Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended CA. *Environment and Planning A*, 30(11): 1943-1967.
- Batty M (2002) Polynucleated urban landscapes. *Urban Studies*, 38(4): 635-655.
- Batty M, Longley P (1994) Urban modeling in computer-graphic and geographic information system environments. *Environment and Planning B*, 19: 663-688.
- Batty M, Kim K S (1992) Form follows function: reformulating urban population density functions. *Urban Studies*, 29: 1043-1070.
- Batty M, Longley P (1994) *Fractal Cities: a Geometry of Form and Function*. Academic Press, San Diego.
- Batty M, Torrens P M (2001) Modeling complexity: the limits to prediction. *CyberGeo (online journal)*: 201.

- Batty M, Xie Y (1994) From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21: 31-48.
- Batty M, Xie Y, Sun Z (1999a) The dynamics of urban sprawl. 15, CASA.
- Batty M, Xie Y, Sun Z (1999b) Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23: 205-233.
- Booker L B, Goldberg D E, Holland J H (1989) Classifier Systems and Genetic Algorithms, *Artificial Intelligence*, 40:235-282.
- Box P W (2000) Garage band science and dynamic spatial models. *Journal of Geographical Systems*, 2: 49-54.
- Couclelis H (1997) From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. *Environment and Planning B: Planning e Design*, 24: 165 – 174
- Couclelis H (1994) Spatial Technologies (Editorial). *Environment and Planning B: Planning and Design* 21(2): 142-143.
- Daffertshofer A, Haken H, Portugali J (2001) Self-organized settlements. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28: 89-102.
- Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M (2000). *Qualitative Geography, Perspective on Spatial Data Analysis*. Sage Publications Ltd, London.
- Frank A U (2000) Geographic information science: new methods and technology. *Journal of Geographical Systems*, 2: 99-105.
- Frankhauser P (2000) GIS and the fractal formalisation of urban patterns: towards a new paradigm for spatial analysis. In Fotheringham A S, Wegener M. (eds.) *Spatial Models and GIS*, Taylor & Francis, London: 121-143.
- Gobin A, Campling P, Feyen J (2001) Spatial analysis of rural land ownership. *Landscape and Urban Planning*, 55: 185-194.
- Goodchild M F, Longley, P (1999) *Geographical Information Systems – Volume 1*, 2<sup>a</sup> ed., John Wiley e Sons, INC., New York.
- Goodchild M F, Longley, P (1999) *Geographical Information Systems. Volume 1*, 2<sup>a</sup> ed., John Wiley e Sons, INC., New York, p. 580.
- Goodchild M F (2000) Spatial analysis: methods and problems in land use management. In Hill M J, Aspinall R J (eds.) *Spatial Information for Land Use Management*, Gordon and Breach Science Publishers, Singapore: 39-50.
- Haken H, Portugali J (1995) A synergetic approach to the self-organization of cities and settlements. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 22: 35-46.
- Jacobs J (1961) *The Death and Life of Great American Cities*. Vintage Books. New York.
- Kronert R, Steinhardt U, Volk M (2001). *Landscape Balance and Landscape Assessment*. Springer-Verlag, Berlin.
- Landis J D (1994) The California urban features model: a new-generation of metropolitan simulation-models. *Environment and Planning B*, 21: 399-420.
- Landis J D (1995) Imagining land use features: applying the California urban futures model. *Journal of American Planning Association*, 6: 438-457.
- Landis J D, Zhang M (1998) The second generation of the California urban features model. Part 1: model logic and theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25: 447 – 461.

- Machado J, Rocha J, Sousa P, Silva E (1997) Os Planos Directores Municipais da Área Metropolitana de Lisboa. Emergência de uma Futura Base de Dados para um novo Planeamento Regional. *Proceedings do ESIG/97*, Junho, Lisboa.
- Mahmud S, Duyar-Kienast U (2001) Spontaneous settlements in Turkey and Bangladesh: preconditions of emergence and environmental quality of gecekondu settlements and bustees. *Cities*, 18(4): 271-280.
- Marceau D J (1999) The scale issue in social and natural sciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25: 347-356.
- Mertens B, Lambin E F (2000) Land cover-change trajectories in Southern Cameroon. *Annals of the Association of American Geographers*, 93: 467-494.
- Openshaw S (1977) A geographical solution to scale and aggregation problems in region-building, partitioning and spatial modeling. *Institute of British Geographers, Transactions, New Series*, 2: 459-472.
- Openshaw S (1984) Ecological fallacies and the analysis of areal census data. *Environment and Planning A*, 16: 17-31.
- Openshaw S (1995) Commentary: Human systems modelling as a new grand challenge area in science. *Environment and Planning A*, 27: 159-164.
- Openshaw S, Clarke G (1996) Developing spatial analysis functions relevant to GIS environments. In Fischer M, Scholten H J, Unwin D. (Eds.) *Spatial analytical perspectives on GIS*, Taylor and Francis, London: 21-37.
- Pijanowski B C, *et al.* (2000) A land transformation model :integrating policy, socioeconomics and environmental drivers using a geographic information system. In Harris L, Sanderson J (Eds.) *Landscape ecology: a top down approach*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Pijanowskia B C, Brown D G, Shellitoc B A, Manikd G A (2002) Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6): 553-575.
- Portugali J (1999) *Self-organization and The City*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Portugali J, Benenson I (1995) Artificial planning experience by means of a heuristic cell-space model: simulating international migration in the urban process. *Environment and Planning A*, 27: 1647-1665.
- Portugali J, Benenson I (1997) Human agents between local and global forces in a self-organizing city. In Schweitzer F, (ed.) *Self-organization of Complex Structure: from Individual to Collective Dynamics*, Gordon and Breach, London: 537-546.
- Portugali J, Benenson I, Omer I (1997) Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 263-285.
- Tannier C, Frankhauser P (2001) From the observations to the construction of a urban dynamics simulation model: an inductive approach. *CyberGeo (online journal)*: 191.
- Tenedório J A, *et al.* (2006) *Modelos geográficos e sistemas complexos. Técnicas de geocomputação aplicadas à previsão de alterações na linha de costa*. In cd-rom do ESIG 2006. USIG. Oeiras.
- Wegener M (2001) New spatial planning models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(3): 224-238.
- White R, Engelen G (1997) Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modelling. *Environment and Planning B*: 24: 235-246.
- White R, *et al* (1997) The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24: 323-343.

- White R, Engelen G (1993) Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25: 1175-1199.
- White R, Engelen G (2000) High resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24: 383-440.
- White R, Engelen G, Uljee I (1997) The use of constrained automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 323-343.
- Wilson A G (1970) *Entropy in Urban and Regional Modelling*. Pion, London.
- Wilson A G (1998) Land-use/transport interaction models: past and future. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32: 3-26.
- Wilson A G (2000) *Complex spatial systems: The modeling foundations of urban and regional analysis*. Prentice Hall, Harlow.
- Wu F (1996) Changes in the structure of public housing provision in urban China. *Urban Studies*, 33(9): 1601-1627.
- Wu F (1998) An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city. *Environment and Planning B: Planning and Design* 25: 103-126.
- Wu F (1998a) An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automata city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25: 731-752.
- Wu F (1998b) The new structure of building provision and the transformation of the urban landscape in metropolitan Guangzhou, China. *Urban Studies*, 35(2): 259-283.
- Wu F (1998c) SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules." *International Journal of Geographic Information Science*, 12(1), 63-82.
- Wu F (1998d). "Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 53: 293-308.
- Wu F (1999) A simulation approach to urban changes: experiments and observations on fluctuations in cellular automata. *The sixth International Conference of Computers in Urban Planning and Management*, Venice.
- Wu F (2000a) The global and local dimension of place-making: rethinking Shanghai as a world city. *Urban Studies*, 37(8): 1359-1377.
- Wu F (2000b) Modelling intrametropolitan location of foreign investment firms in a Chinese city. *Urban Studies*, 37(13): 2441– 2464.
- Wu F (2000c) A parameterised urban cellular model combining spontaneous and selforganizing growth. In Atkinson P, Martin D (eds.) *GIS and Geocomputation (Innovations in GIS 7)*, Taylor & Francis, New York: 73-86.
- Wu F (2001) Housing provision under globalisation: a case study of Shanghai. *Environment and Planning A*, 33(10): 1741-1764.
- Wu F (2002) Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(8) 795-818.
- Wu F, Webster C J (1998) Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 25: 103-126.
- Wu F, Webster C J (2000) Simulating artificial cities in a GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes. *International Journal of Geographical Information Science*, 14: 625-648.

- Wu F, Martin D (2002) Urban expansion simulation of Southeast England using population surface modelling and cellular automata. *Environment and Planning A*, 34(10): 1855-1876.
- Wu F, Yeh A G-O (1997) Changing spatial distribution and determinants of land development in Chinese cities in the transition from a centrally planned economy to a socialist market economy: a case study of Guangzhou. *Urban Studies*, 34(11): 1851-1879.
- Wu J, David J L (2002) A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 153: 7-26.
- Xia Y, Yeh A G-O (2002) Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(6): 323-343.
- Xie Y, Batty M (1997) Automata-based exploration of emergent urban form. *Geographical System*, 4: 83-102.
- Xu J (2001) The changing role of land-use planning in the land development process in Chinese cities: the case of Guangzhou. *Third World Planning Review*, 23(3): 229-248.
- Yeh A G, Li X (2001a) A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28: 733-753.
- Yeh A G, Li X (2002) A cellular automata model to simulate development density for urban planning." *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29: 431-450.