

Actas del V Coloquio de Geografía Cuantitativa
Universidad de Zaragoza
1992, Zaragoza

PERSPECTIVAS SOBRE LOS MODELOS ESPACIALES EVOLUTIVOS

Joseba JUARISTI
*Departamento de Geografía
Universidad del País Vasco*

Introducción

En la historia de la teoría urbana espacial se ha presentado a los modelos dinámicos evolutivos como un desarrollo reciente y prometedor para el estudio de los sistemas espaciales (Wilson, 1981 a). Aunque la década de los años ochenta en el mundo de los geógrafos ha estado marcada por el pluralismo, y toda idea de progreso es acogida con escepticismo o desconfianza, hay que señalar que en este caso la idea de progreso no viene acompañada por un rendimiento "práctico" o "aplicado" de los modelos matemáticos, sino por la supuesta capacidad de dichos modelos de tratar con problemas de evolución de las estructuras espaciales, es decir, la promesa de un rendimiento teórico importante en conexión con nuevas formas de hacer ciencia (Bosque Sendra, 1990).

En esta comunicación pretendemos situar esta nueva forma de modelización respecto a otras formas de modelización practicadas por geógrafos, examinar la capacidad de estos modelos para representar la evolución espacial, y valorar las ventajas e inconvenientes propios de este estilo de modelización.

1. Los modelos matemáticos espaciales estáticos y dinámicos

1.1. La utilización de modelos matemáticos en Geografía y Planificación

La modelización matemática de sistemas espaciales, según sugiere Batty (1989), es una actividad que tiene su origen dentro de un contexto social concreto - las décadas de los años cincuenta y sesenta y preferentemente en Norteamérica - y como tal actividad se instituciona-

liza y perpetúa. Para este autor, la aparición de la modelización tiene como motivo la aplicación práctica, y constituye una excepción a la conocida afirmación de Pasteur: "no hay ciencias aplicadas, sino aplicaciones de la ciencia".

Así, los modelos matemáticos de las décadas mencionadas se desarrollan para hacer frente a la necesidad de solucionar problemas de crecimiento en las áreas metropolitanas: congestión, provisión de viviendas, tráfico, etc, aplicando para ello piezas de teoría económica e ingeniería del transporte. Este tipo de modelos puede estar ejemplificado en el modelo de Lowry (1964), cuyos fundamentos - como es bien conocido- son la teoría de la base económica y la interacción espacial. Otros modelos muy difundidos y cuya aplicación práctica continúa manteniéndose constituyen la "familia" de modelos denominados de "transporte y usos del suelo" en los que se relacionan actividades económicas y usos del suelo mediante tablas input-output dentro de sistemas de zonas urbanas o regionales.

La aplicación de estos modelos persigue un rendimiento "numérico": el conocimiento de ciertas cantidades que permitan tomar decisiones, el conocimiento del impacto de una nueva actividad económica en un sistema de zonas metropolitanas, la estimación de la demanda de viviendas o servicios, el cálculo de flujos de transporte, etc.

La lógica de los modelos se establece mediante series de ecuaciones simultáneas, y en ellos se supone que existe un equilibrio del sistema en consideración. Por ejemplo, en los modelos que utilizan la teoría de la base económica se supone que las tasas de inducción son constantes, o en los modelos de transporte y usos del suelo los coeficientes técnicos que relacionan actividades y usos se suponen igualmente constantes. Tasas y coeficientes son parámetros obtenidos a partir de una realidad empírica estática e introducen cierta tautología en la predicción. Las simulaciones se llevan a cabo sustituyendo el valor de alguna variable y repitiendo los cálculos para registrar los cambios en el resto de las variables.

Aunque los modelos son estáticos, en el sentido de que su representación se realiza mediante ecuaciones simultáneas, se permite en cierta manera las consideraciones dinámicas. De hecho, el cambio introducido en el valor de una variable puede considerarse como una forma de proyección hacia el futuro, en un sentido simple, con un

"antes" y un "después", a pesar de la indeterminación temporal de dicho cambio.

En este tipo de modelos la dimensión temporal no es relevante, como lo muestra el hecho de que a lo largo de la etapa de modelización que estamos comentando no se manifiesta la necesidad de una representación dinámica mediante ecuaciones diferenciales o de diferencias finitas. Tan sólo a comienzos de los años setenta aparecen algunos intentos referentes a la expresión dinámica de la teoría de la base económica (Paelinck, 1970; Batty, 1970), e incluso la expresión dinámica del modelo de Lowry (Batty, 1971).

Aparentemente las ventajas prácticas de la formulación dinámica sólo suponían un rendimiento numérico "temporalizado", pero no añadían mucho más frente a otros refinamientos teóricos con los que se abre la década de los años setenta, en particular la idea de maximización de la entropía aplicada a los modelos de interacción por Wilson (1970).

1.2. Los modelos de dinámica urbana de Forrester

Los modelos dinámicos urbanos - aunque inicialmente "no espaciales", en el sentido de la consideración del espacio en forma de zonas discretas - tienen su origen, como es bien conocido, en el trabajo de Forrester (1969). El modelo de Forrester, según Wilson (1981 a), se construye sobre una base *ad hoc*, con teoría inadecuada y datos aun mas inadecuados, pero tiene el mérito de recordar a los modelizadores su excesiva suficiencia al considerar las condiciones de equilibrio y los métodos comparativamente estáticos como apropiados.

Los modelos dinámicos forresterianos tienen sin embargo otros muchos méritos, ya que se sitúan plenamente dentro de una perspectiva sistémica, que conecta con este paradigma, introducido en las disciplinas geográficas a finales de los años sesenta y comienzos de los setenta (Chapman, 1977; Murcia Navarro, 1978), proporcionan una metodología para el estudio de los fenómenos sociales dinámicos (Aracil, 1979; Bosque Sendra, 1988), y suponen la creación de un lenguaje icónico - diagramación estructural - para la representación de sistemas (Juaristi, 1990).

La construcción de modelos de este tipo persigue tanto un rendimiento "numérico" de cara a la predicción -al menos a corto plazo-, así como la experimentación con diferentes "escenarios" o supuestos de comportamiento del entorno del sistema, como una ayuda para la toma

de decisiones. Pero también se supone que los modelos son una ayuda para comprender el comportamiento anti-intuitivo que surge de la compleja interrelación entre diversos subsistemas.

La principal diferencia entre estos modelos y los que denominaremos "evolutivos" estriba en algunas cuestiones que algunas autoras han calificado como cuestiones de "estilo" (Pumain, Saint-Julien y Sanders, 1989). En efecto, para que estos modelos se utilicen en la predicción es necesario que sean "robustos", es decir que la lógica que conecta entre sí a las variables del sistema sea consistente - o en su caso, que esté construido con una base teórica sólida - y que los modelos sean "insensibles". Esta segunda condición hace referencia a que los cambios en los valores de los parámetros, si bien producen un cambio cuantitativo en las variables, no se altera de forma sustancial la "historia", representada ésta por las variables de estado frente al tiempo.

Los modelos del "estilo" de Forrester han sido poco utilizados en Geografía. Hay algunas aplicaciones como las llevadas a cabo por Chamussy y otros (1984) para representar la dinámica del empleo y vivienda en los Prealpes del sur, y en otros muchos casos han sido extensiones del modelo original de Forrester (Alfeld y Graham, 1976). En muchos casos se han utilizado para representar con cierto detalle la dinámica demográfica (Bosque Sendra, 1988), e incluso la demografía histórica (Whitmore, 1991). De muy pocos de estos modelos se puede decir que han tenido un carácter realmente espacial, ya que en la mayoría de los casos la dinámica representada se refiere a una sola zona, con alguna excepción, como la desagregación espacial del modelo "Navarra 2000" considerando una división espacial de la provincia de Navarra en siete zonas (Martínez y Requena, 1986).

Podría incluirse gran parte de este trabajo de modelización en el tipo de modelos que Aracil califica como orientado hacia la producción de datos (Aracil, 1986), si bien su rendimiento teórico queda limitado por los supuestos de robustez e insensibilidad.

1.3. Los modelos espaciales evolutivos.

Los modelos dinámicos espaciales que dan cuenta de cambios evolutivos surgen en un contexto algo diferente al de los dos tipos de modelos descritos anteriormente. La inspiración de estos modelos tiene diversas fuentes: la dinámica no lineal, la idea de bifurcación, y las

analogías surgidas en campos como la biología teórica, la química física (estructuras disipativas), o en la física (sinérgica).

El anuncio de la posible aplicación de estas ideas en el campo de la geografía a finales de los años setenta y comienzos de los ochenta toma la expresión de un nuevo paradigma, que promete un alejamiento de la concepción fiscalista de la ciencia. Como escribía Brian J.L. Berry en 1980:

"La idea de evolución se desarrolla simultáneamente en la física, la biología y la sociología. En física está asociada con ideas de irreversibilidad, de la disolución de estructuras, de un equilibrio termodinámico de estado estable en el cual se maximiza la entropía. En biología y en sociología prevalece la idea contraria: la evolución es algo ligado a la gran organización y aumenta la complejidad y la organización. Se ha debido al genio de Ilya Prigogine del que hemos aprendido cómo estos dos puntos de vista pueden coexistir y cómo, por el contrario, los cambios revolucionarios en la organización pueden suceder lejos del equilibrio termodinámico". (Berry, 1980, p.457).

Aunque las ideas de Prigogine se refieren a un proyecto amplio y ambicioso de diálogo entre las artes y las ciencias: "las dos culturas" (Prigogine y Stengers, 1979), su influencia en la modelización urbana tiene lugar a través de la denominada Escuela de Bruselas (Pumain, Saint-Julien y Sanders, 1989), y en particular a partir de un primer modelo de lugares centrales que presupone una "auto-organización" (Allen y Sanglier, 1979). Otros autores se inspiran directamente en la teoría de bifurcaciones (Beaumont et al., 1981), o en la teoría de catástrofes (Wilson, 1981 b), autores estos últimos incluidos en la "Escuela de Leeds" en torno a la figura de Alan G. Wilson. Otra alternativa de modelización dentro de esta corriente es la representada por Dendrinos y Mullaly, quienes plantean el desarrollo de una "nueva ecología urbana", señalando que su trabajo es descendiente del realizado por

"la Escuela de Chicago, a la vista de los desarrollos significativos realizados tanto desde la economía urbana y de la teoría de los sistemas urbanos, así como de la ecología matemática" (Dendrinos y Mullally, 1985, pp.29-30).

Por otra parte, en geografía económica ha habido intentos de estudiar las transiciones sectoriales basándose en la dinámica no lineal (Casetti, 1980 y 1981; Casetti y Pandit, 1987).

2. Los fundamentos de los modelos espaciales evolutivos

Los modelos espaciales evolutivos son modelos matemáticos dinámicos expresados mediante ecuaciones diferenciales e implantados en ordenador con el fin de investigar las circunstancias en las que se producen cambios cualitativos en los sistemas que representan. Su carácter espacial viene dado porque el espacio puede estar representado bien en forma continua (como en los modelos más clásicos: von Thünen, Alonso, etc.), o en forma discreta: zonas, puntos con coordenadas fijas, etc, con el fin de discernir diferencias espaciales. Pero en estos modelos, el espacio también puede ser considerado en sus aspectos restrictivos: distancia, superficie limitada, volumen, etc, representado a través de parámetros constantes o variables, de tal forma que es posible incorporar las nociones de espacio absoluto y de espacio relativo.

En todo caso, la forma de representación espacial puede considerarse como una limitación generalizada de la representación de la "evolución", ya que la forma de representación del espacio es establecida *a priori* en las ecuaciones del modelo y como tal forma no evoluciona con el modelo, como veremos más adelante.

El fundamento de los modelos evolutivos es sistémico. Ello implica las ideas sistémicas de realimentación negativa, que representa un "comportamiento propositivo", o de tendencia hacia un objetivo implícito, y la de realimentación positiva, que permite el crecimiento y la evolución a través del cambio - controlado o no - en dicho objetivo. (Aracil, 1986).

La representación matemática más simple de un bucle de realimentación negativa es una ecuación diferencial de crecimiento en la que se introduce un factor inhibidor a ese crecimiento. Ese factor depende del "objetivo implícito" al que tiende el sistema. Un ejemplo simple es la ecuación logística

$$\frac{dN}{dt} = rN \left[\frac{K - N}{K} \right]$$

en la cual N es la variable de estado; r es la tasa de crecimiento "normal", y el término entre corchetes representa el factor inhibitor, ya que el crecimiento dN/dt tiende a cero cuando N se aproxima al valor de K . El límite superior o capacidad de alcance está representado por K , variable que se identifica con el "objetivo implícito" hacia el que tiende el sistema. Desde el punto de vista conceptual la tendencia hacia un objetivo está en la base del concepto de auto-organización expresado en los modelos de la Escuela de Bruselas (Allen, 1991).

La introducción de la realimentación positiva se realiza expandiendo la capacidad de alcance K , haciéndola depender de factores exógenos y/o incluyéndola en la circularidad del modelo, es decir, haciéndola depender de lo que ocurre en otras variables, o en "otras zonas", en este último caso si el sistema se representa mediante zonas discretas. De esta forma el sistema está persiguiendo un objetivo que es a la vez cambiante.

Una tercera condición es que existan no-linealidades en las relaciones entre las variables del modelo. Las no-linealidades permiten que el sistema se desplace de un estado a otro dependiendo de cantidades infinitesimales en algún parámetro o variable de estado. De acuerdo con ello el sistema pasa por singularidades o puntos de bifurcación por encima o por debajo de los cuales el sistema tendrá trayectorias (o futuros) diferentes. Un ejemplo simple de punto de bifurcación lo constituye el valor $r=0$ en el modelo de crecimiento exponencial $dN/dt=rN$. La evidencia de no-linealidades en procesos espaciales es, por otra parte, abundante, dando cuenta de fenómenos tales como procesos de saturación del suelo, aparición de deseconomías, etc.

El contexto sistémico exige que los sistemas sean abiertos, es decir que se encuentren conectados con el exterior mediante flujos (de población, demanda económica, etc).

Si bien los modelos dinámicos del estilo de Forrester incluyen también las condiciones enunciadas aquí, en ellos la inestabilidad tiende

a considerarse como una "anomalía", mientras que la perspectiva evolutiva trata de explotar el carácter inestable de los modelos.

En los modelos de la Escuela de Bruselas una característica será la inclusión de un gran número de parámetros para representar, dentro del carácter determinista de los modelos, las diferentes actitudes de los "actores" respecto a su percepción de los cambios y la reacción ante los mismos. Se considera aquí que las actitudes colectivas pueden ser el resultado de "fluctuaciones" o de la amplificación de pequeños detalles aleatorios, las cuales permiten que el sistema pueda derivar hacia trayectorias diferentes. Una cuestión importante en este sentido es que se tienen en cuenta los aspectos "comportamentales" y "perceptuales" de los individuos expresados mediante parámetros, aunque su tratamiento es muy diferente del de los estudios empíricos sobre percepción o comportamiento. Así la representación mediante parámetros de estos aspectos - que supone una "cuantificación", obtenida mediante el calibramiento de los modelos en sucesivas simulaciones - no implica una "medición" empírica. En este sentido puede observarse bien la diferencia entre cuantificación y medición. Los parámetros obtenidos por calibramiento no tienen un significado en sí mismos y sólo pueden servir de comparación cuando se aplica un mismo modelo a realidades diferentes.

De acuerdo con estos principios se considera que estos modelos tienen una potencialidad "narrativa", de expresión de diferentes "historias" (en el sentido anglosajón de "story telling"). La realización o no de cada "historia" dependerá de la particular configuración de los valores de los parámetros. De esta forma se describen procesos irreversibles y singulares que son la consecuencia del paso del sistema por numerosos puntos de bifurcación.

Uno de los autores mas representativos de esta corriente de modelización, el británico Peter Allen, señala que estos modelos dan cuenta de procesos de auto-organización, describiendo este fenómeno como el resultado de procesos en los que los juicios subjetivos de los actores y sus acciones encaminadas a la consecución de sus objetivos son el resultado de la alternancia - en el sentido temporal - de etapas de aprendizaje e ignorancia, en las cuales las decisiones se llevan a cabo de una forma tentativa y no son necesariamente el resultado de una racionalización justificada en todos sus extremos (Allen, 1991). El mismo autor contrapone la idea de auto-organización frente a la de

"optimización" representada en los modelos mas clásicos de equilibrio espacial.

Los procesos de auto-organización llevan a situaciones de orden ("orden mediante fluctuaciones"), cuya estabilidad puede ser de nuevo interrumpida por la aparición de nuevas fluctuaciones, definidas éstas como un "alejamiento del comportamiento medio".

3. Algunas valoraciones de los modelos evolutivos

Recogemos dentro de este apartado algunas valoraciones realizadas por varios autores referentes al estilo de modelización que es objeto del presente trabajo. No entramos en detalles concretos de los modelos que pueden subsanarse bien técnicamente (con cambios en la representación matemática de algunos subsistemas), o bien empíricamente (mejorando la documentación de los modelos, la desagregación demográfica, espacial, sectorial,etc.). También evitamos el concentrarnos en los aspectos temáticos tratados hasta la fecha, pues consideramos que esta metodología se encuentra aun en sus fases iniciales de desarrollo, y aun no ha tenido una amplia aplicación.

Nos referiremos en concreto a dos modelos de la Escuela de Bruselas : el modelo de lugares centrales de Allen y Sanglier (1979), y al modelo intraurbano de Allen aplicado por un grupo de geógrafas francesas al estudio comparativo de cuatro áreas metropolitanas ¹ (Pumain, Saint-Julien y Sanders, 1989).

El modelo de Allen y Sanglier es un modelo de una región hipotética construido con la finalidad de mostrar cómo operan los procesos de auto-organización espacial para dar lugar a un sistema de lugares centrales jerarquizados partiendo de una situación inicial de lugares centrales homogéneos. Sobre la distribución de lugares centrales se siembran algunas actividades económicas que rompen el equilibrio de empleo existente. Cada lugar central crece de acuerdo con la atracción del empleo -mediante la inmigración desde otros lugares o desde fuera de la región-, y el objetivo implícito hacia el que tiende el sistema consiste en eliminar las discrepancias (o la tensión) entre el empleo y la población existente en cada lugar central. Esta situación se representa

¹.Este modelo fue presentado de forma muy resumida por Therese Saint-Julien en el coloquio de Métodos Cuantitativos de la AGE celebrado en Cáceres. (Saint-Julien, 1989).

mediante funciones logísticas en las cuales el potencial máximo o capacidad de alcance está relacionado con la atracción de empleo que cada lugar puede ejercer.

El modelo muestra que, efectivamente, después de "lanzar en paracaídas" (sic) algunas funciones económicas en lugares concretos y en intervalos de tiempo concretos, los lugares centrales tienden a competir espacialmente, dando lugar a un sistema de áreas jerarquizadas (Allen, 1991).

Sus autores resaltan el valor heurístico por considerar que la situación jerárquica creada es el resultado de un proceso de auto-organización (es la tensión creada en cada lugar central individual lo que lleva a esa situación), frente a la idea de "optimización global" implícita en la teoría de Christaller, que se manifiesta en alguno de los supuestos del geógrafo alemán (el hecho de que las áreas de mercado cubran toda el área de demanda, por ejemplo).

Este valor heurístico ha sido reconocido ampliamente, incluso por los críticos (Huff et al, 1986), quienes sin embargo apuntan algunas limitaciones, como las siguientes:

-No existe en el modelo un mecanismo explícito para "inyectar" la fluctuación. Esta se puede realizar de dos formas: bien de forma aleatoria, cambiando el valor de la población, por ejemplo, o bien deteniendo la simulación y cambiando los valores de algunos parámetros. Por otra parte las fluctuaciones están generadas exógenamente y son el único aspecto que permite al modelo ser considerado como "abierto".

-Una segunda cuestión hace referencia a que sin una intervención directa los parámetros estructurales permanecen constantes, el sistema se equilibra. Ello implica una violación de la teoría original de las estructuras disipativas.

-Otros aspectos críticos señalados por estos autores se refieren a cuestiones técnicas, como la dificultad de calibrar el modelo, aun con pequeños conjuntos de datos, y el aspecto de la representación espacial, en el que existe una geometría definida *a priori* (retícula triangular), que sin ser inmanente a la teoría, tiene la característica de no evolucionar con el modelo.

El modelo intraurbano de Allen ha sido aplicado a cuatro ciudades francesas por Pumain, Saint-Julien y Sanders(1989), y trata de mostrar, de forma comparativa la peculiaridad de los fenómenos de auto-organización en diferentes contextos urbanos. En él se refieren con bastante detalle los mecanismos de inducción de actividades económicas (representados por cuatro ecuaciones de estado para cada zona), y los mecanismos de segregación residencial (representados por dos ecuaciones). Se tienen en cuenta asimismo los mecanismos de fricción de la distancia separando los lugares de trabajo y de residencia. Los procesos demográficos son obviados y se incluyen en la "demanda total" de empleo para cada zona.

Las autoras de este estudio dan cuenta pormenorizada de las dificultades de documentación del modelo ya que los datos originales tienen que ser elaborados de acuerdo con las técnicas de la base económica (mínimos necesarios ,en este caso), y la estimación de algunos parámetros se hace sobre datos nacionales (proporción de trabajadores manuales y no manuales en cada sector económico), y otros de forma comparativa con el caso de Bruselas (consumo de espacio para cada actividad económica). Un total de treinta y dos parámetros son obtenidos mediante calibramiento. Estos representan la velocidad de reacción del sistema respecto a la implantación de actividades, de categorías de población residente, la sensibilidad de los actores a la atracción de actividades económicas y residenciales, las sensibilidades a la distancia, las propensiones de aglomeración de las actividades y los efectos de las deseconomías.

Los resultados de las simulaciones, tratando de ajustar el modelo a la evolución de estas ciudades entre los años 1962 y 1974 (para Burdeos, Estrasburgo y Nantes), y entre 1954 y 1974 para Rouen, se presentan en forma de tabla comparativa (Pumain et al., 1989, p 162, tabla 3.5), mostrando diferentes evoluciones urbanas. Las autoras reconocen que nada garantiza la unicidad de la configuración de los parámetros obtenidos, y , de hecho, algún parámetro tiene - injustificadamente - el mismo valor en las cuatro aglomeraciones urbanas. El modelo se aplica en este estudio de una forma posdictiva, aunque permitiría predicciones basadas en supuestos de demanda exterior (principal variable exógena), y cambios en los parámetros de sensibilidad.

El trabajo de estas autoras ha sido comentado por Hubert Beguin en dos reseñaciones sucesivas (Beguin, 1991 a y 1991 b), quien ha reconocido que el modelo utilizado demuestra su aptitud para reproducir la dinámica urbana observada como resultado de una dinámica de auto-organización. Entre las principales críticas señaladas se apunta, en primer lugar a que el hecho de utilizar numerosos parámetros, ellos deben representar factores que son independientes entre sí. Dentro del contexto sistémico cabría plantearse si muchos de esos parámetros - considerados como constantes - no deberán ser incluidos en la circularidad del modelo. Por ejemplo: ¿no depende la sensibilidad de los actores a la atracción de las zonas urbanas de la abundancia o escasez de suelo para sus actividades?.

En segundo lugar, la abundancia de parámetros refleja también la potencialidad "narrativa", que se presenta con un lenguaje matemático dictado por la intuición. Las autoras reconocen que en algunos casos la representación formal concreta de algunos mecanismos está dictada por la intuición, sin que exista una justificación concreta para elegir, por ejemplo, para la representación de la fricción de la distancia entre una función potencial inversa, o una función exponencial negativa. Beguin opone, por otra parte, la potencialidad narrativa en la descripción de la realidad frente a la potencialidad explicativa:

"En la medida en que un modelo se inspira directamente en la realidad, explica menos, y menos aprendemos de él" (Beguin, 1991 b, p.118).

Finalmente, Beguin subraya la oposición entre los conceptos de auto-organización y optimización, inclinándose hacia la optimización como un postulado más realista que la ausencia de preferencias explícitas, y cita a Granger: "la conducta humana no se describe científicamente más que respecto a criterios de optimalidad".

4. Algunas conclusiones

Las conclusiones a esta forma de modelización necesariamente tienen que ser provisionales, debido al reciente desarrollo de esta metodología. Sin embargo, pueden apuntarse algunas cuestiones referentes a la representación de la idea de evolución, por una parte, y al concepto de auto-organización, por otra.

Ya que el lenguaje de los geógrafos es amplio, y siempre busca (como todos los lenguajes disciplinarios) un alto grado de referencia se-

mántica (Aracil, 1986), el término "evolución" puede adquirir aquí numerosas acepciones y evocaciones: cambio, mudanza, desarrollo, generación-degeneración, morfogénesis, maduración, etc.,etc. Los contextos disciplinarios concretos tienden a perfilar - y quizá a restringir - el significado de este término : se puede hablar de evolución económica, biológica, social, económica, etc. En un sentido puramente estructuralista podría considerarse la evolución como las "leyes de transformación" que están implícitas en la estructura del sistema (Murcia , 1978). No obstante, y debido al origen disciplinar de la analogía de la evolución (biología teórica ,en buena parte), cabría plantear si no se está utilizando el término evolución en el contexto de este tipo de modelos en un sentido restrictivo, o si se quiere, reduccionista.

A pesar de que la analogía biológica y ecológica tienen ya una cierta tradición en geografía (Stoddart, 1967), hasta fechas recientes no se ha utilizado la noción de evolución en la práctica de la construcción de modelos matemáticos. Ello ha sido posible gracias al desarrollo de la ecología teórica (May, 1976). Por tanto, hay que suponer que en las primeras etapas de desarrollo de esta metodología el concepto de evolución biológica predomine sobre otras acepciones. Esto se muestra en algunos planteamientos como el de la "nueva ecología urbana", de Dendrinos y Mullally (1985), o en algunas afirmaciones iniciales como la de Wilson:

"Evolución trata con la emergencia de nuevas especies, habitualmente de 'orden superior'. ¿Hay algún análogo en los estudios urbanos?. Esto tendría relación con nuevas formas de organización o con nuevas formas de comportamiento. El problema de modelar tales fenómenos es que las 'posibilidades técnicas' no son fáciles de conocer (si es que lo son) antes de que la forma haya evolucionado. Pero esto puede plantear tanto una cuestión de investigación emocionante, y un límite que puede ser alcanzado".(Wilson, 1981 a, p.213).

Hay sin embargo, acepciones algo mas amplias:

"En el contexto de sistemas espaciales evolutivos, la evolución se refiere generalmente a la complejidad creciente" ... "y la creciente especialización y organización geográfica"(Griffith y Lea, 1983, p.2).

La representación de la evolución mediante modelos matemáticos dinámicos tiene algunas limitaciones que se relacionan con las formas de representación espacial que deben ser definidas *a priori* en los modelos. Por otra parte, resulta difícil el tratar con la aparición de elementos nuevos e inesperados (innovaciones tecnológicas, por ejemplo), aunque se pueden explorar los impactos espaciales y dinámicos de las innovaciones (Sanglier y Allen, 1989) . Dichos modelos tienen una capacidad para reproducir fenómenos evolutivos cuya historia es conocida: por ejemplo, el paso de una estructura detallista dominada por pequeñas tiendas a otra en la que predominan grandes superficies comerciales; el cambio en la organización residencial de una ciudad, con los fenómenos de segregación que ello lleva consigo, etc.,etc. (y en este sentido la agenda temática es muy amplia y continúa abierta). Pero también tienen un potencial para "inventar historias diferentes" a partir de una situación inicial determinada.

El contexto del descubrimiento de la dinámica espacial evoca épocas pasadas en las que se descubrió una geometría del espacio. Aunque sólo pueda parecer un refinamiento técnico, consideramos un avance teórico importante el que los modelos matemáticos en geografía tengan en consideración esta doble geometría. La exploración de la geometría del espacio/tiempo a través de modelos es una actividad nueva que lleva consigo numerosas dificultades y que en sus aspectos analíticos quedará vedada para la gran mayoría de los geógrafos. No obstante, existe un gran potencial empírico de aplicación, y ya que el rendimiento práctico de este tipo de modelos es aún limitado, conviene tal vez seguir la sugerencia de Beguin (1991 b), de realizar un esfuerzo de síntesis entre los modelos de auto-organización y los modelos mas clásicos. En este sentido cabría una mayor profundización entre lo que representa en el contexto sistémico el concepto de tendencia hacia un objetivo implícito, y en teoría económica y sociológica, el concepto de optimización.

BIBLIOGRAFIA

ALFELD, L.E. y GRAHAM, A.K. (1976): "Introduction to Urban Dynamics". Cambridge. Mass. Wright-Allen Press.

ALLEN, P. (1991): "Spatial Models of evolutionary Systems: subjectivity, learning and ignorance". en Pumain, D. (ed): "Spatial Analysis and Population Dynamics". Montrouge. John Libbey Eurotext.

ALLEN, P.M. y SANGLIER, M. (1979): "A Dynamic Model of Growth in a Central Place System". Geographical Analysis. vol 11. nº 3. pp. 256-272.

ARACIL, J. (1979): "Introducción a la dinámica de sistemas". Madrid . Alianza ed. 3ª ed. 1986.

ARACIL, J. (1986): "Máquinas, sistemas y Modelos". Madrid. Tecnos.

BATTY, M. (1970): "Dynamic Simulation of an Urban System". en Wilson, A.G.(ed): "London Papers on Regional Science". vol. 3. Londres. Pion. pp. 44-82.

BATTY, M. (1971): "Modelling cities as dynamics systems". Nature, nº 321. pp. 425-428.

BATTY, M. (1989): "Urban Modelling and Planning: Reflections, Retrodictions and Prescriptions", en Macmillan, B. (ed): "Remodelling Geography". Oxford. Basil Blackwell. pp. 147-169.

BEAUMONT, J.R., CLARKE, M. y WILSON, A.G. (1981): "The dynamics of urban spatial structure: some exploratory results using difference equations and bifurcation theory". Environment and Planning, nº 13. pp. 1473-1483.

BEGUIN, H. (rev.) (1991 a): "Villes et auto-organisation" por Pumain, D. Saint-Julien, T. y Sanders, L. L' Espace Géographique, vol. 1 (1990-91). pp. 92-93.

BEGUIN, H. (1991 b): "Les modèles urbains dynamiques en perspective". L' Espace Géographique. Vol 2. pp. 117-118.

- BOSQUE SENDRA, J. (1988): "Simulación por ordenador de procesos sociales", en AA.VV.: "Aplicaciones de la Informática a la Geografía y las Ciencias Sociales". Madrid. Síntesis. pp. 237-268.
- BOSQUE SENDRA, J. (1990): "Análisis Estadístico Exploratorio y Confirmatorio en Geografía". En IV Coloquio de Geografía Cuantitativa. Universitat de les Illes Balears-Asociación de Geógrafos Españoles. pp. 405-445.
- CASETTI, E. (1980): "Equilibrium Population Partitions between Urban and Agricultural Occupations". *Geographical Analysis*. vol. 12. pp 47-54.
- CASETTI, E. (1981): "A Catastrophe model of Regional Dynamics". *Annals of the Association of American Geographers*. vol 71, nº 4. pp. 572-579.
- CASETTI, E. y PANDIT, K (1987): "The non linear dynamics of sectoral shifts". *Economic Geography*, vol 63. pp. 241-258.
- CHAMUSSY, H., GUERIN, J.P., LE BERRE, M. y UVIETTA, P. (1984): "La dynamique de systèmes. Une methode de modélisation des unités spatiales". *L'Espace Géographique*, nº 2. pp. 81-93.
- CHAPMAN, G.P. (1977): "Human and Environmental Systems; a geographer's appraisal". Londres. Academic Press.
- DENDRINOS, D.S. y MULLALLY, H. (1985): "Urban Evolution: studies in the Mathematical Ecology of Cities". Oxford. OUP.
- FORRESTER, J. (1969): "Urban Dynamics". Massachusetts. MIT Pres.
- GRIFFITH, D.A. y LEA, A.C. (eds.) (1983): "Evolving Geographical Structures", NATO-ASI series D. nº 15. La Haya. Boston. Lancaster. Martinus Nijhof.
- HUFF, J. et al (1986): "Dynamic Central Place Theory: an appraisal and future prospects", en Griffith, D. A. y Haining, R.P. (eds): "Transformations Through Space and Time". NATO-ASI Series D. nº 29. Dordrecht. Boston. Lancaster. Martinus Nijhof. pp. 121-151.
- JUARISTI, J. (1990): "Enseñanza y práctica de la dinámica de sistemas en Geografía: el programa Stella". En Actas del IV Coloquio de

Geografía Cuantitativa. Universitat de les Illes Balears-Asociación de Geógrafos Españoles. pp. 183-204.

LOWRY, I.S. (1964): "A Model of Metropolis". Santa Mónica. Rand Corporation.

MARTINEZ, S. y REQUENA, A. (1986): "Dinámica de Sistemas". 2 vols. Madrid. Alianza.

MAY, R.M. (1976): "Simple Mathematical Models with very Complicated Dynamics". *Nature*. vol 261. pp 459-467.

MURCIA, E. (1978): "El paradigma sistémico en Geografía y Ordenación del Territorio". *Ciudad y Territorio* nº 4. pp 35-50.

PAELINCK, J. (1970): "Dynamic Urban Growth Models". *Papers of the Regional Science Association*, nº 214. pp 25-38.

PUMAIN, D., SAINT-JULIEN, T. y SANDERS, L. (1989): "Villes et auto-organisation". París. Economica.

SAINT-JULIEN, T. (1989): "La modelización de la dinámica intra-urbana aplicada al campo de algunas grandes ciudades francesas". *Norba*. vol. VIII y IX. (III Coloquio de Geografía Cuantitativa. Cáceres). pp 109-124.

SANGLIER, M. y ALLEN, P. (1989): "Evolutionary models of urban systems: an application to the Belgian provinces". *Environment and Planning A*. vol 21. pp 477-498.

STODDART, D.R. (1967): "Organism and Ecosystem as Geographical Models", en Chorley, R.J. y Haggett, P. (eds): "Models in Geography". Londres. Methuen. pp 511-548.

WHITMORE, T.M. (1991): "A simulation of the sixteenth-Century Population Collapse in the Basin of Mexico". *Annals of the Association of American Geographers*. vol 81 (3) pp 464-487.

WILSON, A.G. (1970): "Entropy in Urban and Regional Modelling". Londres. Pion.

WILSON, A.G. (1981 a): "The Evolution of Urban spatial structure: the evolution of theory" en Bennet, R.J. (ed): "European Progress in Spatial Analysis". Londres. Pion. pp 201-225.

WILSON, A.G. (1981 b): "Catastrophe Theory and Bifurcation. Applications to Urban and Regional Systems". Londres. Croom Helm.