

Document downloaded from:

<http://hdl.handle.net/10251/136194>

This paper must be cited as:

Llorca Ponce, A. (2007). Aplicación de la teoría de los sistemas complejos y la autoorganización al estudio de la distribución del tamaño de las empresas [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/136194>



The final publication is available at

Copyright Universitat Politècnica de València

Additional Information

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS,  
ECONOMÍA FINANCIERA Y CONTABILIDAD**



**Aplicación de la teoría de los sistemas complejos y la  
autoorganización al estudio de la distribución del  
tamaño de las empresas**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:  
D<sup>a</sup>. Alicia Llorca Ponce

Dirigida por:  
Prof. Dr. D. Manuel Pérez Montiel

Valencia, diciembre de 2006



*A Jesús*



## ***AGRADECIMIENTOS***

Una tesis doctoral suele ser un trabajo que, en muchos casos, dura varios años y al que se deben dedicar muchas horas que, generalmente, se roban a la familia. En primer lugar, quiero expresar un profundo agradecimiento a mi marido por su apoyo constante a lo largo de todos estos años. La finalización de esta tesis es un éxito de ambos y a él se la dedico.

En segundo lugar a mis hijas, Miranda y Andrea, por la fuerza que me transmiten, porque siempre han sido un continuo estímulo y fuente de alegrías en mi vida. La realización de mis estudios de doctorado, que comencé cuando mi hija mayor contaba con 6 meses de edad, hasta su culminación en esta Tesis, es algo que permanecerá en mi memoria, siempre, unido a la infancia de mis hijas. En deuda estoy con ellas por todas las horas que no les pude dedicar.

También quiero expresar un sincero agradecimiento a mi director de tesis, Manuel Pérez Montiel, por la buena tarea realizada. La disponibilidad de tiempo para conversar conmigo y ayudarme en la gestación de las ideas ha sido fundamental para que este trabajo haya podido ver la luz. De él admiro su creatividad, y la capacidad de estimular en otros la curiosidad intelectual, cualidades, pienso, muy valiosas para el trabajo que debe desarrollar un buen profesor de postgrado y especialmente un director de tesis.

A Salvador Llop por la realización del diseño de la portada y a Carlos Lerma por su ayuda con el software. Y, para finalizar, a todas aquellas personas, tanto amigos como compañeros de la universidad, profesores de diferentes departamentos, especialmente Matemática Aplicada, que, amablemente, me

ayudaron y, en muchos casos, me aportaron comentarios, siempre útiles e interesantes.

## ***RESUMEN***

El trabajo de investigación, que se presenta a continuación, trata de avanzar en la explicación de un fenómeno contrastado empíricamente: el comportamiento asimétrico de la distribución del tamaño de las empresas. La evidencia empírica al respecto, ha mostrado que, en la mayor parte de los casos, las economías son abastecidas por empresas de todos los tamaños. El comportamiento asimétrico de la distribución nos indica que los mercados están formados, generalmente, por muy pocas empresas de gran tamaño junto a un número elevado de empresas de pequeño tamaño. Este comportamiento, lejos de ser una característica exclusiva de la distribución del tamaño de las empresas, está presente tanto en otros fenómenos de carácter económico, como pertenecientes a otros campos muy diversos.

En 1949, el lingüística George Kingley Zipf publicó un trabajo en el que dio a conocer diversos fenómenos, distribuidos de forma asimétrica, en los que se podía observar una relación matemática entre el tamaño de un suceso y su frecuencia de aparición. Esta relación, hoy conocida como ley de Zipf, nos indica que la frecuencia de aparición de un determinado suceso depende inversamente de su tamaño o intensidad. Aplicado a la distribución del tamaño de las empresas, el cumplimiento de la ley implica que la frecuencia de aparición de empresas con un determinado tamaño depende inversamente del tamaño alcanzado por ésta elevado a una potencia. Este tipo de comportamiento ya fue descubierto por Pareto, en el año 1896, en una cuestión polémica: la distribución de los ingresos de la población.

Desde la publicación del trabajo de Zipf muchos han descubierto la presencia de leyes potenciales en la distribución de diversos fenómenos: la intensidad de los terremotos, la frecuencia de aparición de las palabras, las avalanchas de extinción de especies, o las visitas a las páginas web, entre otros.



Hoy por hoy, se reconoce el carácter ubicuo de este comportamiento conocido como distribuciones de ley potencial. Pese a la importante evidencia empírica al respecto, las explicaciones teóricas sobre la abundante aparición de fenómenos que se distribuyen como leyes potenciales no han tenido demasiado éxito.

Esta investigación, centrada en el ajuste de la distribución del tamaño de las empresas a la ley de Zipf, amplía la evidencia empírica al respecto, pues comprueba su cumplimiento para las empresas españolas. Ahora bien, más allá del trabajo empírico, el objetivo de la investigación es avanzar en las posibles explicaciones teóricas del fenómeno. En este sentido, las investigaciones realizadas consideran que el paradigma de la complejidad y la autoorganización es el enfoque más adecuado para abordar la cuestión. Se concluye que las leyes potenciales observadas en sistemas complejos son una característica de la arquitectura de los sistemas autoorganizados. Concretamente, la ley de Zipf observada para la distribución del tamaño de las empresas es una manifestación de la autoorganización del sistema, en nuestro caso del mercado.

Las leyes potenciales son consideradas como un macrocomportamiento que emerge de forma espontánea en los sistemas y que se deriva de las múltiples interacciones entre los agentes que lo forman. De estas últimas, surge la pauta o comportamiento estadístico que sólo es observable a nivel del sistema como un todo. La investigación reconoce la relación entre la aparición de leyes potenciales y los procesos de autoorganización, a partir de aquí, el reto es tratar de determinar qué tipo de procesos dan lugar a la emergencia de estas leyes. Aunque existen algunas explicaciones y modelos teóricos al respecto, no parecen ser suficientemente satisfactorios, aún queda mucho por avanzar en la búsqueda de los mecanismos subyacentes que generan la aparición de leyes potenciales en la distribución del tamaño de las empresas.

## ***ABSTRACT***

The research work presented below tries to advance the explanation of an empirically contrasted phenomenon: the asymmetric behaviour of the distribution of the size of companies. Empirical evidence in this regard has shown that, in most cases, economies are supplied by companies of all sizes. The asymmetric behaviour of the distribution indicates us that markets are generally made up of very few large-size companies next to a high number of small-size companies. This behaviour, far from being an exclusive characteristic of the distribution of the size of companies, is present in other phenomena not only economic, but also belonging to other very different fields.

In 1949, linguistic George Kingsley Zipf published a work in which he talked about various phenomena, distributed in an asymmetric way, where you could see a mathematic relation between the size of an event and the frequency of its appearance. This relation, today known as Zipf's law, indicates us that the appearance frequency of a certain event inversely depends on its size or intensity. Applied to the distribution of the size of companies, the compliance of the law implies that the appearance frequency of companies of a certain size inversely depends on the size achieved by them raised to a power. This behaviour was already discovered by Pareto in 1896 in a controversial question: the distribution of income in a population.

Since Zipf's work was published, many others have discovered the presence of potential laws in the distribution of different phenomena: the intensity of earthquakes, the frequency of words occurrence, the avalanches of species in danger of extinction, or the visits to web pages, among others. Nowadays, the ubiquitous character of this behaviour known as distributions of potential law is recognized. In spite of the important empiric evidence in this

regard, theoretical explanations about the abundant appearance of phenomena that are distributed as potential laws have not been very successful.

This research, centered in adjusting the distribution of the size of companies to the Zipf law, widens the empirical evidence in this regard: it checks compliance thereof for Spanish companies. Nonetheless, beyond empirical work, the aim of the research is to advance the possible theoretical explanations of the phenomenon. In this sense, the researches carried out consider that the paradigm of complexity and self-organization is the most suitable approach to deal with this matter. The conclusion is that potential laws observed in complex systems are a characteristic of the architecture of self-organized systems. Specifically, Zipf law observed for the distribution of the size of companies is a sign of the selforganization of the system, in our case of the market.

Potential laws are considered as a macrobehaviour which spontaneously emerges in systems and derives from the multiple interactions between the agents involved. From these interactions, the statistic behaviour or guideline comes out; it can only be observed at the level of the system. The research recognizes the relation between the appearance of potential laws and the selforganization processes; from now on, the challenge is to try to determine which type of processes give place to the emergence of these laws. Although there are some theoretical explanations and models in this regard, they do not seem to be sufficiently satisfactory; there is still much to advance in the search of underlying mechanisms that generate the appearance of potential laws in the distribution of the size of companies.

## **RESUM**

El treball d'investigació presentat a continuació tracta d'avançar en l'explicació d'un fenomen contrastat empíricament: el comportament asimètric de la distribució del tamany de les empreses. L'evidència empírica al respecte ha mostrat que, en la majoria dels casos, les economies són abastides per empreses de tots els tamanyos. El comportament asimètric de la distribució ens indica que els mercats estan formats, generalment, per molt poques empreses de gran tamany juntament amb una xifra elevada d'empreses de tamany xicotet. Aquest comportament, lluny de ser una característica exclusiva de la distribució del tamany de les empreses, és present en uns altres fenòmens tant de caràcter econòmic com pertanyents a uns altres camps molt diversos.

El 1949, el lingüista George Kingley Zipf va publicar un treball en què va donar a conèixer diversos fenòmens, distribuïts de manera asimètrica, en els quals es podia observar una relació matemàtica entre el tamany d'un succés i la seua freqüència d'aparició. Aquesta relació, hui coneguda com la llei de Zipf, ens indica que la freqüència d'aparició d'un determinat succés depèn inversament del seu tamany o intensitat. Aplicat a la distribució del tamany a les empreses, el compliment de la llei indica que la freqüència d'aparició d'empreses amb un determinat tamany depèn inversament del tamany aconseguit per aquesta elevat a una potència. Aquest comportament ja va ser descobert per Pareto l'any 1896 en una qüestió polèmica: la distribució dels ingressos de la població.

D'ençà de la publicació del treball de Zipf molts han descobert la presència de lleis potencials en la distribució de diversos fenòmens: la intensitat dels terratrèmols, la freqüència d'aparició de les paraules, les allaus d'extinció d'espècies, o les visites a les pàgines web, entre d'altres. Ara per ara es reconeix el caràcter ubic d'aquest comportament conegut com a distribucions de llei potencial. Malgrat la important evidència empírica al respecte, les explicacions

teòriques sobre l'abundant aparició de fenòmens que es distribueixen com a lleis potencials no han tingut gaire èxit.

Aquesta investigació, centrada en l'ajustament de la distribució del tamany de les empreses a la llei de Zipf, amplia l'evidència empírica al respecte: comprova el seu compliment per a les empreses espanyoles. Ara bé, més enllà del treball empíric, l'objectiu de la investigació és avançar en les possibles explicacions teòriques del fenomen. En aquest sentit, les investigacions realitzades consideren que el paradigma de la complexitat i l'autoorganització és l'enfocament més adequat per abordar la qüestió. Es conclou que les lleis potencials observades en sistemes complexos són una característica de l'arquitectura dels sistemes autoorganitzats. Concretament, la llei de Zipf observada per a la distribució del tamany de les empreses és una manifestació de l'autoorganització del sistema, en el nostre cas del mercat.

Les lleis potencials són considerades com un macrocomportament que emergeix de manera espontània en els sistemes i que es deriva de les múltiples interaccions entre els agents que el formen. D'aquestes últimes sorgeix la pauta o comportament estadístic que només és observable en l'àmbit del sistema. La investigació reconeix la relació entre l'aparició de lleis potencials i els processos d'autoorganització. A partir d'ací, el repte és tractar de determinar quin tipus de processos donen lloc a l'emergència d'aquestes lleis. Encara que hi ha algunes explicacions i models teòrics al respecte, no semblen ser suficientment satisfactoris. Encara queda molt per avançar en la recerca dels mecanismes subjacents que generen l'aparició de lleis potencials en la distribució del tamany de les empreses.

## **ÍNDICE**

INTRODUCCIÓN.....	1
1. Inicios de la investigación.....	1
2. Contenido.....	4
3. Hipótesis de trabajo.....	9
4. Estructura del trabajo.....	10
<b>PARTE I: LEYES POTENCIALES Y DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS.....</b>	<b>13</b>
CAPÍTULO 1. EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS: UNA VISIÓN PRELIMINAR.....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Los trabajos más tempranos.....	17
1.3. La distribución del tamaño de las empresas: aproximaciones desde la estadística.....	24
1.4. Ley potencial para la distribución del tamaño de las empresas.....	31
CAPITULO 2. LEYES POTENCIALES EN SISTEMAS NATURALES Y SOCIALES.....	33
2.1. Introducción.....	33
2.2. La ubicuidad de las leyes potenciales.....	34
2.3. Mandelbrot y las distribuciones de ley potencial en economía: las fluctuaciones en los precios.....	41
2.3.1. La distribución de ingresos.....	41
2.3.2. Los precios del algodón y las cotizaciones bursátiles..	42

2.3.3. Leyes potenciales y fractalidad.....	46
2.4. La distribución del tamaño de las empresas.....	48
<b>CAPITULO 3. LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EM- PRESAS EN ESPAÑA. EVIDENCIA EMPÍRICA....</b>	<b>55</b>
3.1. Introducción.....	55
3.2. La distribución del tamaño de las empresas en España y otros países de la Unión Europea.....	56
3.3. Fractalidad e invarianza de escala en el espacio.....	66
<b>PARTE II: COMPLEJIDAD Y AUTOORGANIZACIÓN, FUN- DAMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>73</b>
<b>CAPÍTULO 4. TEORÍAS DE LA COMPLEJIDAD.....</b>	<b>75</b>
4.1. Introducción.....	75
4.2. Del paradigma mecanicista al paradigma de la complejidad...	77
4.3. El enfoque de sistemas.....	81
4.4. La termodinámica de los sistemas cerrados y la teoría de los sistemas abiertos. Orden y desorden.....	86
4.5. Sistemas y macrosistemas.....	91
4.5.1. Jerarquía de sistemas.....	91
4.5.2. Funcionamiento de los sistemas abiertos.....	94
4.6. La teoría del caos o de la dinámica no lineal.....	96
4.6.1. Mandelbrot y la geometría fractal.....	99
4.6.2. Del orden al caos y del caos al orden.....	100
4.7. Sistemas complejos adaptativos.....	102
<b>CAPÍTULO 5. TEORÍA DE LA AUTOORGANIZACIÓN.....</b>	<b>111</b>
5.1. Introducción .....	111
5.2. La autoorganización desde la termodinámica de los sistemas abiertos.....	112
5.2.1. Tipos de sistemas: sistemas en equilibrio, cercanos al equilibrio y alejados del equilibrio.....	113

5.2.2. Sistemas autoorganizados y estructuras disipativas....	119
5.2.3. Estructuras inertes y seres vivos.....	120
5.3. La autoorganización desde las ciencias de la complejidad.....	122
5.3.1 Autoorganización desde la física: sistemas críticamente autoorganizados.....	123
5.3.2. La vida en el borde del caos y la autoorganización en biología.....	128
5.3.3. Redes emergentes.....	140
<b>PARTE III: LA EMERGENCIA DE ORDEN EN SISTEMAS COMPLEJOS.....</b>	<b>149</b>
<b>CAPÍTULO 6. SISTEMAS AUTOORGANIZADOS.....</b>	<b>151</b>
6.1. Introducción al pensamiento descentralizado .....	151
6.2. Algunos ejemplos de sistemas autoorganizados.....	154
6.2.1. Sistemas de autoorganización en seres vivos.....	154
6.2.2. Sistemas de información.....	158
6.2.3. La conducta social.....	159
6.3. Interacciones locales y emergencia de comportamientos globales.....	160
6.4. Pensamiento centralizado versus pensamiento descentralizado.....	164
6.5. Características de los procesos de autoorganización.....	170
<b>CAPÍTULO 7. AUTOORGANIZACIÓN EN ECONOMÍA.....</b>	<b>173</b>
7.1. Introducción.....	173
7.2. El mercado un gran sistema complejo autoorganizado.....	175
7.2.1. Carl Menger y el origen de las instituciones.....	175
7.2.2. Friedrich Hayek y el orden extenso.....	177
7.3. Micromotivos de los agentes y macroconducta del agregado. Algunos modelos de autoorganización en economía.....	185
7.3.1. El modelo de segregación de Schelling.....	188
7.3.2. La formación de las edge cities un ejemplo de orden producto de la inestabilidad.....	193



7.3.3. El orden producto del crecimiento aleatorio.....	196
<b>PARTE IV: BREVE DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVE- STIGACIÓN.....</b>	<b>201</b>
<b>CAPÍTULO 8. DE ZIPF A LOS MODELOS DE AGENTE.....</b>	<b>203</b>
8.1. Introducción.....	203
8.2. El orden producto del crecimiento aleatorio y el modelo de Simon.....	209
8.3. Orden en Grandes Redes.....	211
8.4. Modelos de Agente.....	218
8.4.1. La simulación como herramienta metodológica en el estudio de fenómenos sociales	219
8.4.2. Modelos de agente: definición y características.....	224
8.4.3. Los modelos multi-agente aplicados al estudio de fenómenos económicos.....	228
8.4.4. Algunas cuestiones epistemológicas sobre la utiliza- ción de modelos basados en agentes.....	229
8.4.5. Un Modelo multi-agente que reproducen distribu- ciones de ley potencial.....	231
8.4.6. Un modelo multi-agente en la explicación de la dis- tribución del tamaño de las empresas.....	235
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>239</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>245</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 0.1. Distribución del tamaño de las empresas en Estados Unidos durante la década de los años treinta, el tamaño se aproxima por el nivel de activos.....	3
Figura 1.1. Distribución rango-frecuencia de las palabras. (A). Datos de James Joyce; (B) Datos de Eldridge; (C) Curva ideal con pendiente $-1$ .....	21
Figura 1.2. Rango-Tamaño. Número de asalariados por empresa en el sector manufacturero en Estados Unidos Año 1939. Tamaño mínimo 50 trabajadores.....	23
Figura 1.3. La ley rango-tamaño para las empresas españolas en el año 2001. El tamaño se ha aproximado por los ingresos de explotación.....	32
Figura 2.1. Distribución de la magnitud de los terremotos en la zona de Nuevo Madrid en el sudeste de Estados Unidos durante el periodo de 1974-1983.....	37
Figura 2.2. Tamaño en las ciudades en Estados Unidos.....	38
Figura 2.3. La Regla Rango-Tamaño para las ciudades de la Comunidad Valenciana. Año 2004.....	39
Figura 2.4. Distribución de las extinciones. Curva que representa los datos extraídos por Raup (1991) de los datos sobre fósiles suministrados por Sepkoski.....	40
Figura 2.5. Indicios originales de la invarianza por cambio de escala en economía. Fluctuaciones en los precios del algodón.....	45
Figura 2.6. Geometría fractal en la naturaleza.....	47
Figura 2.7. La regla rango-tamaño para la distribución del tamaño de las empresas estadounidenses. Año 1997.....	49

Figura 3.1. Distribución de frecuencias acumuladas del tamaño de las empresas en España. Distribución de Pareto, año 2002.....	57
Figura 3.2. Distribución de frecuencias del tamaño de las empresas en España, año 2002.....	57
Figura 3.3. Ley de Zipf en la distribución del tamaño de las empresas en España, año 2002.....	58
Figura 3.4. La Regla Rango-Tamaño en la distribución del tamaño de las empresas en España, año 2002.....	58
Figura 3.5. Comparación de la regla rango-tamaño cuando aproximamos el tamaño a partir de diferentes variables. Año 2001.....	61
Figura 3.6. La Regla Rango-Tamaño para la distribución del tamaño de las empresas a lo largo del periodo 1998-2002.....	63
Figura 3.7. La regla rango tamaño en países de la Unión Europea. Año 2002.....	64
Figura 3.8. La Ley de Zipf, relación entre la frecuencia del tamaño y su rango en varios países de la Unión Europea.....	65
Figura 3.9. La ley de Zipf para diferentes sectores de la economía en España. Año 2002.....	68
Figura 3.10. Invarianza de escala en el espacio.....	71
Figura 4.1. Agregados y sistemas.....	85
Figura 4.2. Sistemas aislados, cerrados y sistemas abiertos.....	87
Figura 4.3. Jerarquía de sistemas.....	93
Figura 4.4. Modelo general de sistema abierto.....	94
Figura 4.5. Algunos sistemas complejos adaptativos del planeta Tierra.	107
Figura 4.6. Funcionamiento de un sistema complejo adaptativo.....	108
Figura 5.1. Ejemplo de sistema alejado del equilibrio: reacción de Belousov-Zhabotinsky.....	117
Figura 5.2. Otro ejemplo de sistema alejado del equilibrio: la inestabilidad de Bénard.....	118
Figura 5.3. Dibujo original del experimento de la pila de arena.....	127

Figura 5.4. Tamaño de las avalanchas y frecuencia de cada una de ellas cuando el sistema (la pila de arena) ha alcanzado la pendiente crítica.....	128
Figura 5.5. Transición de fase en el grafo aleatorio.....	135
Figura.5.6. Representación esquemática de los regímenes ordenado, en la frontera del caos y caótico para las redes boleanas.....	140
Figura 5.7: Redes aleatorias: redes exponenciales y redes libres de escala. ....	143
Figura 5.8. Distribución de ley potencial para la conectividad de la red	146
Figura 6.1. Aparición de propiedades emergentes de las interacciones entre los elementos del sistema que acaban afectando a éstas.....	161
Figura 7.1. Modelo de segregación de Schelling.....	190
Figura 7.2. Imagen de los resultados de Krugman. Un modelo sobre localización espacial de las actividades económicas.....	196
Figura 7.3. Distribución del tamaño de las ciudades originado por el crecimiento aleatorio.....	199
Figura 8.1. El modelo de enlace preferencial de Barabasi y Albert.....	213
Figura 8.2. Fragmentación de una red ecológica con topología de mundo-pequeño y distribución potencial de las conexiones.....	218
Figura 8.3. La lógica de la simulación frente a la modelización estadística como método.....	221
Figura 8.4. Sugarscape, un modelo capaz de generar una distribución de la riqueza que se ajuste a una ley potencial.....	234



## **INDICE DE CUADROS**

Cuadro 3.1. Variables de ajuste a la recta de regresión $y = -\alpha x + b$ , siendo $x$ e $y$ el logaritmo del rango y el tamaño respectivamente. España 2001.....	62
Cuadro 3.2. Regla Rango-Tamaño en España para el periodo 1998-2002, valores de la recta de regresión y coeficiente de ajuste.....	63
Cuadro 3.3. La regla rango-tamaño en países de la Unión Europea, año 2002. Valores de la pendiente de la recta de regresión lineal y del coeficiente $R^2$ .....	65
Cuadro 3.4. Ley de Zipf para varias categorías de actividad en la economía española. Ajuste de los datos a la recta de regresión entre el logaritmo de la frecuencia y el logaritmo del tamaño y valores de $R^2$ .....	68
Cuadro 3.5. Ley Rango-Tamaño para diferentes categorías de actividad. Valores de la recta de regresión. Año 2002.....	69
Cuadro 3.6. Sector Construcción. Ley de Zipf. Valores de la pendiente de la recta de regresión: log tamaño = $-\alpha \log$ rango + C y bondad del ajuste.....	70
Cuadro 5.1. Diferencias significativas entre los diferentes tipos de sistemas según su posición de equilibrio.....	115



## ***INTRODUCCIÓN***

La investigación en el campo de la economía, quizás en mayor medida si la comparamos con otras ramas del saber, se ha orientado hacia el desarrollo de modelos teóricos que han tratado de ser relativamente sencillos y sobre todo exentos de ambigüedad a partir de la adopción de una serie de premisas muy definidas. Una vez que el modelo teórico es definido, la investigación trata de contrastar empíricamente su veracidad y es aquí donde generalmente surgen los principales problemas, bien porque la teoría no se ajusta a los resultados reales, es decir, porque ésta no se cumple, o bien porque los resultados que arroja la evidencia empírica no son tan claros como se desearía. El objeto de estudio de esta investigación: la distribución del tamaño de las empresas presenta una problemática contraria y menos habitual. La evidencia empírica, bastante abundante, muestra unos resultados muy claros, sin embargo, no emergen explicaciones teóricas satisfactorias del fenómeno observado.

### ***1. Inicios de la investigación***

Los inicios de esta investigación se remontan a la época en que acudía a mis clases de doctorado siete años atrás. En cierta ocasión debatíamos sobre el tamaño de las empresas y más concretamente sobre la conocida “dimensión óptima” de la teoría marshalliana. Si como predice la teoría, las empresas presentan una dimensión óptima en la que sus costes se minimizan y se alcanza más eficiencia, es lógico derivar que las empresas deberían orientarse hacia la búsqueda de esta dimensión que asegurará su supervivencia en el mercado. Pero, ¿qué mostraba la evidencia empírica? Se recogieron datos sobre el tamaño de empresas en diferentes localizaciones, de forma generalizada los análisis empíricos mostraban que los mercados, generalmente, estaban abastecidos por



empresas de todos los tamaños. Una vez evidenciada la diversidad en el tamaño, el paso siguiente debería dirigirse hacia la búsqueda de una explicación a esta evidencia. ¿Cómo era posible compatibilizar estos resultados con la teoría neoclásica de la oferta y su “dimensión óptima”? Fue justo a partir de este momento, al constatar mi incapacidad para dar una mínima explicación a la diversidad de tamaños encontrada, cuando esta cuestión atrajo realmente mi interés.

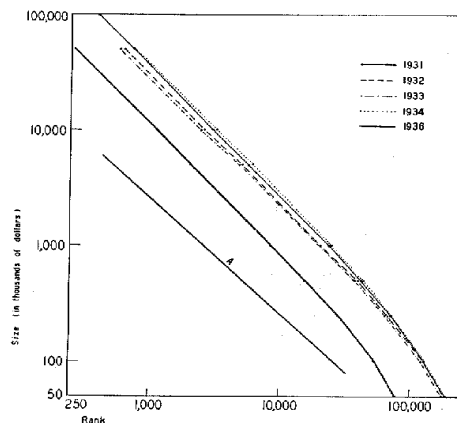
En aquel momento mis herramientas metodológicas se limitaban a la microeconomía neoclásica, había que tratar de explicar por qué existían empresas de todos los tamaños, o también valdría poder explicar por qué las empresas difieren de tamaño, por qué no son todas iguales. Pero tratar de explicar la diversidad encontrada con las herramientas analíticas de la microeconomía neoclásica parecía algo imposible. Aunque para muchos esto no constituya ninguna sorpresa, ya que actualmente se considera que diversos conceptos expuestos por la teoría neoclásica y especialmente por Marshall han sido superados, y que además, se tiene mayor conocimiento de las limitaciones de esta metodología; lo cierto es que los fundamentos neoclásicos siguen ocupando una parte importante de los conocimientos sobre análisis económico que se imparten actualmente en la mayor parte de nuestras universidades. Por ello, las conclusiones y razonamientos de este enfoque siguen influyendo en nuestra forma de percibir la relevancia del tamaño.

Debido a las anteriores limitaciones orienté mi investigación hacia la búsqueda de trabajos que trataran sobre la distribución del tamaño de las empresas desde cualquier enfoque alternativo.

En el año 1958 Herbert Simon publica un artículo en la *American Economic Review* titulado *The size distribution of bussines firm*, en él evidencia que la distribución del tamaño de las empresas en Estados Unidos es altamente asimétrica. Observó que en esta economía existían pocas empresas de gran tamaño junto a un elevado número de empresas de reducido tamaño. El objetivo de Simon en este trabajo fue doble: por un lado tratar de encontrar una función de distribución teórica para el tamaño de las empresas y por otro definir un modelo estocástico que fuera capaz de reproducir este tipo de asimetría. En los siguientes

años a su publicación, el trabajo de Simon pareció caer en el olvido, puede afirmarse que no suscitó el interés de los investigadores. Sin embargo, décadas después, en los 90, será redescubierto, y especialmente relevante para las llamadas ciencias de la complejidad y la autoorganización.

Definitivamente, la lectura del libro de Paul Krugman, *La Organización espontánea de la Economía* marcó el camino de esta investigación. En él tuve conocimiento de una ley empírica, conocida como ley de Zipf o Regla Rango-Tamaño. Dicha ley establece que si consideramos las empresas de un país y las ordenamos de mayor a menor en función de su tamaño asignando a cada una de las empresas un rango, de manera que la empresa de rango 1 será la de mayor tamaño y la de rango 2 la siguiente de mayor tamaño entre las demás, la ley predice que podemos encontrar una relación entre el tamaño de la empresa y su rango. El tamaño es inversamente proporcional al rango. La ley aparece publicada por primera vez en 1949 para la distribución del tamaño de las empresas estadounidenses en los años treinta. Si representamos ambas variables el rango y el tamaño en términos logarítmicos, la distribución de los datos forma una línea recta con una pendiente de 45°.



Fuente: Zipf (1949, p. 499)

***Figura 0.1. Distribución del tamaño de las empresas en Estados Unidos durante la década de los años treinta, el tamaño se aproxima por el nivel de activos.***

## **2. Contenido**

La ley de Zipf sorprende por su simpleza matemática, demuestra una relación lineal entre el logaritmo del rango y el tamaño, y choca drásticamente con la forma de presentar y exponer las ideas en el mundo económico. Cuando se conoce la ley, lo normal es mostrar incredulidad y después contrastar si se cumple para la distribución del tamaño de las empresas en España. A partir de los datos proporcionados por SABI<sup>1</sup> seguí los pasos de Zipf, seleccione todas las empresas que aparecen en la base en el año 2002, por encima de un tamaño mínimo y las ordené de forma decreciente asignándoles a cada una de ellas un rango. La ley se cumplía y el exponente al igual que en Zipf(1949) se aproximaba a 1. Comprobé que también se cumplía al considerar empresas pertenecientes a límites geográficos más pequeños como la Comunidad Valenciana.

Ante esta evidencia dirigí la investigación a conocer que se había publicado sobre esta ley. Zipf un lingüista profesor en Harvard aplicó inicialmente su ley a la frecuencia de aparición de las palabras, Evidenció que en el uso del lenguaje unas pocas palabras eran utilizadas muy frecuentemente mientras que un gran número de palabras aparecían pocas veces. El trabajo empírico de Zipf fue vastísimo, comprobó el cumplimiento de la ley en fenómenos muy diversos como la distribución del tamaño de las ciudades, los ingresos de la población y el tamaño de las empresas.

En términos generales, podemos afirmar que la ley de Zipf evidencia que muchos fenómenos se distribuyen de forma asimétrica, tal que se observa una relación inversa entre la frecuencia de aparición del suceso y su tamaño. Como veremos, la aparición de este tipo de distribuciones revela que no existe una escala característica del fenómeno, sino que por el contrario existen sucesos de todos los tamaños.

Hoy la ley de Zipf está ampliamente difundida en el mundo científico, se ha comprobado en fenómenos que pertenecen a campos tan diversos como la

---

<sup>1</sup> Sistema Anual de Balances Ibéricos, es una base de datos (comercial) de empresas que operan en España y Portugal.

física, la biología, la geografía, la lingüística o la economía. Cuando hablamos de la ley de Zipf en el campo de la economía, es necesario destacar varios hechos. La cuestión parece haber interesado poco a los economistas, a excepción de Simon y su grupo de colaboradores. En los siguientes años a la publicación del trabajo de Zipf nadie parece haberse ocupado de la cuestión, contrariamente a lo ocurrido en otras ramas del saber en las que este tipo de distribuciones han recibido mucha mayor atención. Pese al poco interés mostrado se conocen fenómenos económicos que se ajustan a este comportamiento desde largo tiempo atrás. De hecho, uno de los trabajos en los que se inspiró Zipf fue el *Cours d'économie politique* de Pareto, publicado en 1896, en él demuestra que la distribución de los ingresos de la población es altamente asimétrica, que puede observarse una relación inversa entre el nivel de ingresos personales y su frecuencia de aparición entre la población. Actualmente, existe una cantidad relevante de investigadores de campos diversos como la matemática y especialmente la física que se han ocupado de analizar la aparición de este tipo de distribuciones en fenómenos económicos, entre ellos la distribución del tamaño de las empresas.

El desarrollo relativamente reciente de las tecnologías de la información ha jugado un importante papel en el aumento de la cantidad de trabajos relacionados con esta ley empírica, pues su contrastación requiere la disponibilidad de gran cantidad de datos, no disponibles dos décadas atrás. Estos avances han conducido a que cierta parte de la investigación se haya orientado a estudiar la distribución de grandes masas de datos intentando encontrar algún tipo de pauta o comportamiento en ellos. Este hecho, unido a la gran cantidad de información económica disponible en la actualidad, explica el renovado interés que muchos científicos, de campos diversos, han mostrado por las distribuciones asimétricas en fenómenos económicos y concretamente en el estudio de la distribución del tamaño de las empresas.

Actualmente, existe suficiente evidencia empírica que avala el cumplimiento de la ley. Se trata de una relación que asombra por su simplicidad y que contrasta con la dificultad de la investigación teórica al respecto. Para mostrar el comportamiento asimétrico de estas distribuciones, los investigadores han

utilizado diferentes herramientas analíticas, de manera que la ley es definida con varios términos. Hoy sabemos que lo que se conoce como ley potencial, ley de Zipf o ley de Pareto, son formas alternativas de representar un mismo tipo de asimetría en la distribución del tamaño, ya sea el número de empleados en una empresa, los ingresos personales o la población de las ciudades.

Pero, ¿qué sabemos hoy de esta ley? Simon el primer interesado en la cuestión desde el campo de la investigación económica, define un modelo en el cual, a partir de supuestos estocásticos asignados a las premisas, reproduce este tipo de distribuciones. Hoy en día el modelo de Simon es considerado por algunos como el más satisfactorio o útil para explicar la aparición de ciertas leyes potenciales, en campos como la economía y la formación de redes.

Una segunda aportación fundamental (no por aparecer en segundo lugar es menos importante que la de Simon) en el conocimiento que tenemos de las leyes potenciales, ha sido la realizada por el matemático Benoît Mandelbrot, conocido por ser el creador de la geometría fractal. Este investigador se ocupó, en sus inicios, del estudio de las leyes potenciales. Supo de la ley de Zipf de forma casual, como el mismo relata: «Una recensión de un libro que encontré en la papelería de mi tío me inició en una tarea extravagante en todos los sentidos: la de explicar la “ley de Zipf”». Mandelbrot (1985, p.212). Su trabajo profundiza en las características de estas distribuciones y contribuye a constatar el carácter universal de la ley. Mandelbrot demuestra que las leyes potenciales están presentes tanto en la naturaleza como en los fenómenos económicos. Entre estos últimos, destacan sus trabajos sobre el comportamiento de las fluctuaciones en los precios.

En la actualidad la ley de Zipf, como ley empírica, ocupa un lugar que podría considerarse destacado en lo que se conoce como ciencias de la complejidad. Un nuevo campo que estudia los *comportamientos emergentes* en los llamados sistemas complejos. En estos, los agentes o elementos participantes interaccionan unos con otros y debido a ello, surgen comportamientos emergentes que no pueden determinarse a partir de la conducta individual de cada participante. La incapacidad de los métodos tradicionales de la ciencia para

explicar este tipo de comportamientos y la necesidad de elaborar nuevos contextos teóricos y metodológicos son las razones que inspiran a estas teorías.

En general podemos decir que la Complejidad se ocupa del estudio de fenómenos que exhiben conducta compleja. El comportamiento complejo es entendido como oposición al comportamiento lineal, reversible y determinista del mecanicismo. Los sistemas que interesan, en este caso, muestran una dinámica no lineal e impredecible. De hecho, una parte muy importante de lo que hoy se consideran ciencias de la complejidad proviene de campos que han estudiado la no linealidad.

Para esta investigación es, especialmente, útil aquella parte del campo de la complejidad que estudia la emergencia del orden espontáneo, la denominada autoorganización. Ésta se encarga de estudiar como surge el orden de forma espontánea en los sistemas complejos que reciben el nombre de sistemas autoorganizados o emergentes. En estos momentos, podemos considerar que las distribuciones de ley potencial o de Zipf son una manifestación de la autoorganización del sistema, la distribución observada es un macro-comportamiento, una manifestación de orden que emerge de forma espontánea en sistemas complejos. Hoy, el gran reto es tratar de descubrir que tipo de procesos dan lugar a la emergencia de este tipo de distribuciones.

La investigación en Economía no parece haberse interesado demasiado en las posibilidades que representan las nuevas ciencias de la complejidad como nueva herramienta metodológica, pese a los numerosos llamamientos que se han hecho, especialmente de investigadores de otras ciencias. Ahora bien, las ideas de complejidad, autoorganización y emergencia, aunque no hayan tenido gran trascendencia, han estado presentes en la economía desde tiempo atrás.

En este trabajo estamos de acuerdo con la hipótesis de que la economía y más concretamente el mercado es un sistema complejo autoorganizado. Sustentan esta hipótesis las ideas desarrolladas por Menger (1883,1996), Hayek(1988, 1997), Schelling(1978,1989) y Krugman (1996, 1997) como trabajos más destacados. Los tres primeros autores, especialmente Schelling y Menger, llegaron a conclusiones similares a las alcanzadas por investigadores de la

autoorganización en otros campos como la física o la biología sin tener ningún contacto con los trabajos desarrollados por éstos. Menger fue el primero que mostró que ciertas estructuras sociales tenían un origen espontáneo, un ejemplo paradigmático es su *teoría del origen del dinero*. Por otro lado, Hayek es quizás quién más ha profundizado en la autoorganización inherente al desarrollo del mercado, un mecanismo descentralizado en el que el orden emerge de forma espontánea. La información dispersa es, a juicio de Hayek, lo que conduce a que un sistema descentralizado sea más eficiente que uno centralizado. A través de multitud de agentes, en nuestro caso empresas, el sistema será capaz de aprovechar de mejor forma la información diseminada. El mecanismo de mercado crea las condiciones para que esa información fluya y sea aprovechable por los agentes. En resumen, la economía, a través del mercado, procesa una información que fluye por el sistema y que se deriva de la actuación de miles de agentes a partir sus interrelaciones, de esta manera el sistema va generando cada vez más complejidad.

El trabajo de Schelling: *Micromotivos y macroconductas*, entra directamente a abordar la cuestión de cómo se produce la emergencia de orden en sistemas sociales y por supuesto en el mercado y nos advierte que ese orden emergente no tiene porque ser satisfactorio. Schelling nos ayuda a enfocar las cuestiones económicas desde la complejidad y la autoorganización. Nos muestra las similitudes con otros campos en los que el orden también emerge de forma espontánea pero, a su vez, nos advierte de las peculiaridades que supone estudiar la conducta emergente en fenómenos económicos. Por último, el trabajo de Krugman es el que tiene más carácter transdisciplinar, conocedor de los desarrollos en complejidad y autoorganización en otros campos, utiliza modelos e ideas desarrolladas en otras ciencias y las adapta al estudio de fenómenos económicos. Krugman está especialmente interesado en descubrir procesos que generen conductas emergentes en el campo de la economía, concretamente en el campo de la geografía económica y de los procesos económicos en el espacio.

Que los fenómenos económicos entran dentro del campo de estudio de la complejidad es algo evidente. Los mercados están formados por gran cantidad de agentes diversos, ya sean consumidores o empresas, que interaccionan unos con

otros dando lugar a una conducta compleja y a características emergentes. Las reglas que rigen el funcionamiento de un mercado (por el lado de la oferta) no pueden ser explicadas por la conducta individual de una empresa, a nivel del mercado emergen comportamientos que no podían ser previstos deliberadamente por las partes. En este contexto, la distribución del tamaño de las empresas observada no puede ser explicada a partir del estudio de las empresas en particular tenemos que deducirla desde enfoques que se orienten a abordar la totalidad. Este trabajo tiene como objetivo aplicar las herramientas de la complejidad y la autoorganización para explicar la distribución observada del tamaño de las empresas.

### **3. *Hipótesis de trabajo***

Las hipótesis sobre las que se trabajará en esta investigación son:

1. La economía y más concretamente el mercado es un sistema complejo autoorganizado, donde el orden –complejo– emerge de forma espontánea de las interacciones entre los agentes del sistema. El mercado, al igual que otros sistemas sociales, es un sistema ascendente “de abajo a arriba”, en estos sistemas los problemas se resuelven recurriendo a masas de elementos (en nuestro caso empresas), relativamente inteligentes.
2. La ley potencial observada en la distribución del tamaño de las empresas, es una macroconducta que emerge de la interacción de los agentes individuales –las empresas– que participan en el mercado. Es una manifestación de la autoorganización del sistema.
3. La ley potencial puede ser reproducida a partir de modelos que establecen determinadas pautas de comportamiento sobre la conducta de los agentes del sistema. Los programas de simulación son hoy una herramienta muy útil para el estudio de este tipo de sistemas, permiten reproducir su dinámica y estudiar cómo se produce la emergencia.



#### **4. Estructura del trabajo**

El presente trabajo de investigación se estructura en cuatro partes con el objetivo de proporcionar más claridad en la exposición de los argumentos. La primera parte, que incluye los tres primeros capítulos, se centra en determinar qué sabemos sobre la distribución del tamaño de las empresas y las leyes potenciales, también conocidas como leyes de Zipf y Pareto. Esta primera parte tiene un doble objetivo, en primer lugar proporcionar suficiente evidencia empírica que avale el ajuste de la distribución del tamaño de las empresas a una ley potencial y mostrar que este comportamiento, lejos de ser algo extraño, es muy común en fenómenos económicos y sociales. El capítulo 1 nos introducirá en el estudio de las distribuciones asimétricas en economía hasta momentos recientes: el capítulo 2 mostrará que la conducta de ley potencial es universal, que está presente en gran cantidad de fenómenos muy diversos. Y el capítulo 3 profundizará en la distribución del tamaño de las empresas observada en España, en los resultados que nos proporciona la evidencia empírica.

La segunda parte del trabajo se encargará de desarrollar los fundamentos teóricos y metodológicos del enfoque de la complejidad y la autoorganización. Debido a la variedad de teorías que hoy se incluyen en este programa, se ha decidido dividir esta parte en dos capítulos. El primero de ellos, el capítulo 4, pretende explicar el cambio metodológico que suponen estas teorías y en describir las características fundamentales de su objeto de estudio, los sistemas complejos. El capítulo 5 se destinará al estudio de lo que entendemos por la emergencia espontánea de orden, es decir, la autoorganización.

La tercera parte se reserva al estudio de los sistemas complejos autoorganizados. El capítulo 6 resume las características fundamentales de estos sistemas, entre los que se incluye el mercado; y el capítulo 7 se centra en las ideas relativas a la emergencia de orden espontáneo en la economía.

Por último, la parte final se destina a proporcionar, en primer lugar, un breve retrato sobre el estado actual de la cuestión, y en segundo, a proponer la

metodología basada en *modelos de agente* como herramienta fundamental para la futura investigación. Por último se aportan las conclusiones del trabajo y las líneas o cuestiones relevantes para la futura investigación.



## **PARTE I.**

# **LEYES POTENCIALES Y DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS**

---

«Podemos hallar regularidades, predecir la aparición de regularidades similares en otras partes, descubrir que las predicciones se confirman e identificar así un modelo sólido; no obstante, puede tratarse de un modelo cuya explicación continúe escapándose. En este caso, hablamos de una teoría “empírica” o “fenomenológica”, pomposas palabras que significan básicamente que vemos que algo sucede, pero no podemos explicarlo.»

Gell-Mann (2003, pp.110-111)



## **CAPÍTULO 1**

# ***EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS: UNA VISIÓN PRELIMINAR***

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

El *teorema central del límite*<sup>2</sup> es una premisa muy utilizada cuando se trata de determinar como se distribuyen ciertos valores de una población, como por ejemplo la estatura de las personas. Si un suceso se distribuye como una normal, los valores de la muestra tienden a concentrarse alrededor de la media, es decir la media es representativa de la distribución del suceso. Sin embargo, en el caso de otro tipo de distribuciones, la aplicación del teorema central del límite es más peligrosa puesto que aunque la media muestral de las muestras sea normal, dicha media no es representativa, el suceso no tiene un tamaño característico. Existen muchos fenómenos, como la distribución del tamaño de las empresas en los que no es posible determinar un valor característico. Los datos reales muestran que una gran cantidad de mercados son abastecidos por empresas de todos los tamaños y, además, que unas pocas empresas obtienen una gran cantidad de ingresos frente a una importante cantidad de empresas con pequeños ingresos.

---

2. El teorema es resultado del siguiente postulado: para muestras aleatorias de cualquier distribución de base con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , por no normal que sea, la distribución muestral de  $\bar{x}$ , la media muestral de muestras aleatorias de tamaño  $n$ , es aproximadamente normal y la aproximación mejora al aumentar  $n$ . La distribución normal de aproximación tendrá naturalmente por media a  $\mu$  y por varianza a  $\sigma^2/n$ .

Así pues, la distribución de frecuencias del tamaño de las empresas tiene un comportamiento asimétrico. Veremos que este tipo de comportamiento, lejos de ser un aspecto exclusivo de la distribución del tamaño de las empresas, es un fenómeno muy común en la naturaleza. Algunos ejemplos de fenómenos que exhiben este tipo de conducta son: la intensidad de los terremotos, el tamaño de las ciudades, o la distribución de los ingresos de una población, Ijiry y Simon (1977).

La distribución del tamaño de las empresas, aunque nunca haya sido un tema crucial para los investigadores, sí ha despertado cierto interés desde tiempo atrás. En los países industriales la distribución es altamente asimétrica. Durante bastante tiempo los estudiosos del tema intentaron encontrar una función teórica de probabilidad para describir la distribución del tamaño de las empresas; sin embargo, los trabajos realizados llegaron a la conclusión de que no es posible encontrar una distribución con carácter general. Pese a este fracaso, varios autores inspirados en trabajos anteriores como el de Zipf (1949), encontraron que los datos reales sobre la distribución del tamaño de las empresas se ajustaban muy bien a las distribuciones de ley potencial. Aunque en economía este tipo de distribuciones no eran muy conocidas –como veremos Pareto y Simon serán la excepción– en otros campos de la ciencia como la física, biología, geología o lingüística, las conductas de ley potencial habían sido observadas en muchos sistemas con características muy diversas. Ya en la década de los ochenta, el desarrollo de las teorías de la complejidad y la autoorganización darán un nuevo impulso al estudio de la distribución del tamaño de las empresas, los nuevos enfoques y desarrollos científicos, que se funden en este paradigma, proporcionarán nuevas herramientas que permitirán interpretar el fenómeno desde nuevas ópticas.

En este capítulo se expondrán, en primer lugar, los descubrimientos de trabajos preliminares y de gran impacto como han sido los de Pareto, Zipf y Gibrat, continuaremos con un repaso de los avances realizados por estudiosos como Simon y sus co-autores, y finalizaremos el capítulo, mostrando ciertas evidencias empíricas muy recientes que avalarán el ajuste de la distribución del

tamaño de las empresas a la ley potencial. Las posibles interpretaciones y explicaciones de este comportamiento potencial se dejarán para posteriores capítulos.

## 1.2 LOS TRABAJOS MÁS TEMPRANOS

La historia del estudio de la distribución de los ingresos es muy larga en el tiempo. Pareto, hace más de 100 años en un trabajo publicado en 1896<sup>3</sup>, observó que la distribución de los ingresos personales en una población era altamente asimétrica: unas cuantas familias poseían unos ingresos muy elevados mientras que existía un número muy elevado de familias con ingresos bajos. Más aún, Pareto obtuvo que la distribución de los ingresos se ajustaba a una ley potencial conocida como ley de Pareto que expresa la distribución de los ingresos en términos de una función de distribución acumulada. Observó que la frecuencia de que una determinada población tenga un nivel de ingresos superior a un tamaño  $x$  depende inversamente de dicho tamaño elevado a una potencia. Tal que:

$$P[X > x] \sim x^{-k} \quad (1)$$

donde  $k$  recibe el nombre de exponente de Pareto.

En sus análisis Pareto obtuvo que la distribución de los ingresos personales sigue una ley potencial con posible exponente universal de un valor aproximadamente igual a 1,5.

Unas décadas más tarde Gini (1922) estudia la distribución de los ingresos en diversos países encontrando que los datos reales pueden ajustarse de forma bastante robusta a leyes potenciales, sin embargo, a diferencia de Pareto, dichos exponentes no son universales.

---

3. *Cours d'économie politique*, (1896, 1965) Reeditado como un volumen de *Ouvres Complètes*. Ed: Droz, Ginebra.



En el año 1931 aparece publicado el primer trabajo que tiene por objetivo analizar la distribución del tamaño de las empresas, es decir la dimensión de la empresa ya no desde una perspectiva individual sino de grupo. El trabajo del economista francés Robert Gibrat titulado *Desigualdades Económicas*<sup>4</sup> tiene una importante trascendencia, pues muchos son los trabajos posteriores que se inspiraron o tomaron como punto de referencia los planteamientos de Gibrat. Él propone un modelo donde, a partir de procesos de crecimiento aleatorio multiplicativos, se deriva una distribución de ingresos para las empresas que se ajusta a una distribución log-normal. El modelo de Gibrat se basa en una premisa: la “ley del efecto proporcional” que tuvo y sigue teniendo una importante repercusión en el desarrollo de trabajos futuros, una repercusión que para algunos es considerada como sorprendente, Richiardi (2004).

El propósito de Gibrat fue convencer de que la asimetría en la distribución del tamaño de las empresas era una regularidad lo suficientemente precisa como para servir de base a un modelo matemático serio. Para ello traza los orígenes de su pensamiento en el trabajo de Jacobus Kapteyn, un astrónomo que se preocupó por la aparente gran difusión de las distribuciones asimétricas en muchos aspectos diversos, especialmente en campo de la biología. La aproximación de Kapteyn consideraba que lo subyacente a estas distribuciones es un simple proceso “gaussiano” donde un gran número de pequeñas influencias sumadas, operando independientemente unas de otras, tienden a generar una distribución normal para la varianza (“ley de Laplace” en el modelo de Kapteyn). Para Kapteyn y van Uven (1916) las distribuciones asimétricas de una variable se pueden producir suponiendo que alguna función subyacente de la variable considerada se distribuye como una normal. Gibrat (1931), inspirado en el trabajo de estos, establece como premisa que el valor esperado del incremento en el tamaño de las empresas en cada periodo es proporcional al tamaño corriente de la empresa (no depende del tamaño de la empresa, ni positiva ni negativamente). Aplicando esta premisa obtiene que la distribución límite de la variable tamaño

---

4. Robert Gibrat (1931): *“Les inégalités économiques; applications: aux inégalités des richesses, à la concentration des entreprises, aux populations des villes, aux statistiques des familles, etc., d’une loi nouvelle, la loi de l’effet proportionnel”*. Paris: Librairie du Recueil Sirey.

de la empresa pasa a distribuirse de forma asimétrica como una lognormal. Contrasta empíricamente su modelo a partir un extenso rango de datos sobre la distribución del tamaño de establecimientos y concluye que la distribución real se ajusta razonablemente bien a la log-normal. Los trabajos permiten observar la distribución del tamaño de las empresas en un periodo de tiempo comprendido entre 1896 y 1921 para muchos sectores de la economía nacional, como la agricultura y el comercio, y también para poblaciones de empresas en distintas regiones y sectores.

Aunque el trabajo de Gibrat (1931) fue calificado por varios investigadores de su tiempo como un gran logro, sin embargo, durante las dos décadas siguientes la distribución del tamaño de las empresas no ocupó la atención de los investigadores. Como ya había notado Gibrat, el desarrollo de este tipo de trabajos implicaba destinar un importante esfuerzo a la recopilación de datos y su posterior análisis. Este hecho pudo haber limitado el desarrollo de trabajos en esta línea y ser la causa de que la distribución del tamaño de las empresas no fuese objeto de interés hasta bien entrada la década de los 50 y en mayor medida de los 60, momento en el que aparecen varios trabajos empíricos que se ocupan directamente de la cuestión. En esta década y la siguiente proliferarán estudios centrados en la generación de modelos de “crecimiento aleatorio”.

Sin ninguna conexión con los trabajos de Gibrat, George Kingsley Zipf nacido en 1902 y profesor de lengua en la Universidad de Harvard desde finales de los años 20, considerado un académico heterodoxo y excéntrico, descubrió la que hoy se conoce como “ley de Zipf”. Una regularidad empírica que aparece en muy diversos fenómenos entre los que se encuentra nuestro objeto de estudio. Zipf, en sus primeros trabajos, se dedicó al estudio de ciertas regularidades en el campo de la lingüística, comenzó estudiando la economía humana del habla, esto es, las restricciones habituales en la expresión oral cotidiana, para abordar más tarde el uso del vocabulario en la producción escrita, Zipf (1932, 1935). Observó que la frecuencia de aparición de las palabras en un texto, lejos de ser impredecible seguía una pauta: encontró una relación entre la frecuencia de aparición de las palabras en un texto seleccionado y el rango ocupado por dicha

palabra entre todas las que aparecen en el texto; es más, afirmaba que la frecuencia de aparición de cada palabra es inversamente proporcional a su número de orden o rango.

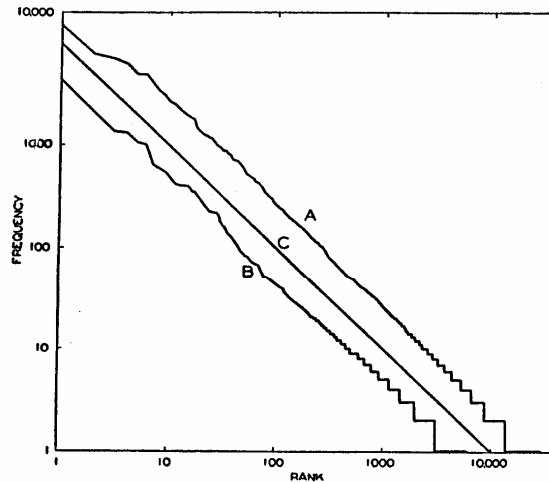
Después de contrastar su ley para diversos aspectos relacionados con la lingüística, Zipf, en su libro publicado en 1949 y titulado *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, demostró que esta ley también se podía extender a muchos otros casos como la distribución del tamaño de las ciudades, de los ingresos personales o del tamaño de las empresas.

La ley de Zipf en su definición original, Zipf (1949, 1972, p. 23), afirma que si cogemos todas las palabras que aparecen en un texto, en su caso fue el *Ulises* de Joyce, a continuación calculamos su frecuencia de aparición; las ordenamos de mayor a menor y les asignamos un rango, de manera que el rango igual a 1 sea ocupado por aquella palabra que se utiliza más frecuentemente, y el rango 2 por aquella palabra que ocupe el segundo lugar en frecuencia de aparición y así sucesivamente para todas las palabras; podremos observar una relación inversa entre la frecuencia de aparición de la palabra y su rango. Dicha relación es definida por Zipf(1949, 1972, p.24) a partir de la siguiente expresión:

$$r \times f = C \quad (2)$$

donde  $f$  representa la frecuencia de aparición de una palabra en el texto;  $r$  es el rango que ocupa la palabra;  $C$  es una constante que se aproxima a la frecuencia de aparición de la palabra de rango 1 o palabra más frecuentemente utilizada. Si representamos las variables, rango y frecuencia de aparición, en términos de logaritmos los datos se ajustan a una línea recta descendente con una pendiente de  $45^\circ$ . En resumen, Zipf demuestra que cuando se cumple su ley, la relación entre la frecuencia de aparición de un suceso y su rango se ajusta a la siguiente expresión:

$$\log f = - \log r + \log C \quad (3)$$



Fuente: Zipf, G.K. (1972, 1949), *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, p.25.

**Figura 1.1. Distribución rango-frecuencia de las palabras. (A) Datos de James Joyce; (B) Datos de Eldridge; (C) Curva ideal con pendiente -1.**

Otra “regla” que también contrastó Zipf (1949, p.374), y que posteriormente llegó a conocerse como *rango-tamaño* trata de determinar una posible relación entre el tamaño de los distintos elementos de una muestra y el lugar o rango que ocupan dichos elementos en el conjunto de la población. Para comprobar si se cumple la *regla rango-tamaño* en la distribución del tamaño de las empresas de una determinada región o país, cogemos las empresas de la población considerada por encima de un determinado tamaño –medido por ejemplo por el nivel de empleo– y las colocamos en orden descendente, asignando a cada empresa un rango. Se observa que la relación entre el tamaño o número de empleados de una empresa y el lugar que ocupa dicha empresa en el ranking de empresas de ese país o región, se ajusta a la siguiente expresión:

$$T = K \times r^{-\beta} \quad (4)$$

Siendo:  $r$  el rango, que toma siempre un valor entero y positivo;  $T$  el tamaño de la empresa, medido por alguna variable que aproxime el tamaño (entre las variables más utilizadas destacan el empleo, la cifra de ventas, el valor añadido, o los fondos propios); y  $K$  una constante que en la versión estricta de Zipf (con  $\beta=1$ ) es igual al tamaño de la empresa de rango 1.

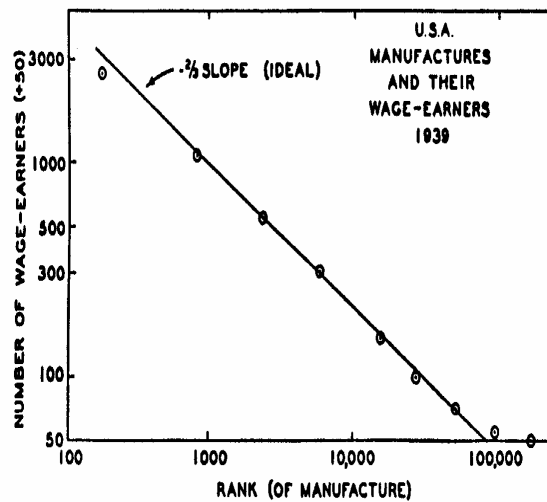
Zipf (1949) demuestra el cumplimiento de la ley en los siguientes casos:

- Número de asalariados (por encima de 50) por empresa manufacturera en Estados Unidos en el año 1939.
- Valor del activo por empresa en Estados Unidos para cada uno de los años comprendidos en el periodo (1931-1936).
- Número de establecimientos por tipo de actividad del sector manufacturero en Estados Unidos para el año 1939.
- Número de establecimientos o locales por tipo de comercio minorista en Estados Unidos en 1939.

En todos los casos comprobó la relación lineal entre el logaritmo del rango y del tamaño, a partir del ajuste de los datos a la siguiente expresión:  $\log T = -\beta \log r + \log K$ . Siendo  $K$  un parámetro y  $T$  el tamaño -sea número de asalariados, volumen de activo, o número de establecimientos, en cada caso-.

Siendo la pendiente  $\frac{d \log T}{d \log r} \approx -\beta$ .

Cuando el exponente sea igual a 1, o esté muy próximo a este valor, es decir, si se cumple la ley de Zipf en sentido estricto, podemos obtener una secuencia de los tamaños de la distribución multiplicando la constante -que corresponde al tamaño de la empresa más grande- por 1, 1/2, 1/3, 1/4, etc. En este caso, el tamaño de la empresa de rango 2 sería aproximadamente igual a la mitad del tamaño de la empresa 1, en general el tamaño de cualquier empresa de la población considerada, en logaritmos, podría obtenerse a partir de la constante, o tamaño de la empresa más grande, por  $1/r$ .



Fuente: Zipf (1949, 1972, p.384)

**Figura 1.2. Rango-Tamaño. Número de asalariados por empresa en el sector manufacturero en Estados Unidos Año 1939. Tamaño mínimo 50 trabajadores.**

Actualmente, una parte significativa de la literatura que trata de distribuciones como la descrita por Zipf, las define como leyes potenciales. La distribución de un suceso se ajusta a una ley potencial cuando su frecuencia de aparición depende inversamente de su tamaño elevado a una potencia. Durante bastante tiempo los trabajos de Zipf, Pareto y aquellos que trataban de las distribuciones de ley potencial permanecieron aislados. Hoy sabemos que estos tres aspectos representan distintas maneras de abordar un mismo tipo de fenómenos con distribución altamente asimétrica. Pareto es la distribución de frecuencias acumuladas de una distribución de ley potencial y Zipf es su expresión en términos de rango. En todos estos casos, teóricamente, cualquier tamaño de una empresa dentro del conjunto puede obtenerse como una proporción de su rango. En la actualidad sabemos que la ley de Zipf (en sentido estricto  $\beta=1$ ) es uno de los muchos ejemplos de las llamadas leyes de escala o leyes potenciales, comunes en muchas áreas de la física, la biología y las ciencias del comportamiento, Gell-Mann (2003, p.111).

El vastísimo trabajo empírico realizado por Zipf ha contribuido a constatar la universalidad de las distribuciones de ley potencial. Aunque sus explicaciones teóricas han sido desacreditadas, no ha ocurrido lo mismo con su trabajo empírico. La validez de sus resultados ha conducido a otras interpretaciones como la de Mandelbrot desde los campos de la matemática o la física de los sistemas complejos. En todo caso, la ley de Zipf ha sido, habitualmente, un referente para los trabajos que desde la estadística han tratado de explicar la distribución del tamaño de las empresas.

### 1.3. LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS: APROXIMACIONES DESDE LA ESTADÍSTICA

El trabajo de Gibrat (1931) ha marcado un punto de partida para muchos otros que, desde modelos estocásticos, han pretendido encontrar una explicación a la forma de la distribución del tamaño de las empresas. Gibrat consideraba que los datos empíricos sobre los ingresos de las empresas se ajustaban bien a las distribuciones log-normal, en éstas los valores presentan una asimetría hacia la derecha significando que la mayor parte de la probabilidad se reúne o cae hacia la derecha del valor modal. En las distribuciones asimétricas como distribución del tamaño de las empresas, la moda es más pequeña que la mediana la cual, a su vez, es más pequeña que la media. En el modelo de Gibrat esta distribución es consecuencia de *la ley del efecto proporcional*: el crecimiento de las empresas es considerado como un proceso aleatorio con tasas de crecimiento independientes del tamaño. El crecimiento en el tamaño de la empresa puede obtenerse a partir del tamaño alcanzado en el periodo anterior<sup>5</sup>. Aplicando esta premisa, el tamaño de las empresas tiende hacia una distribución log-normal. Amaral (1997) afirma que si consideramos  $S_{t+\Delta t} = S_t(1 + \varepsilon_t)$ , donde  $\varepsilon_t$  es una serie de números aleatorios con algún límite en la distribución y varianza mucho menor que 1; y si el logaritmo del tamaño sigue un simple paseo aleatorio, considerando un periodo

---

5. Gibrat en su modelo considera el cumplimiento de la “ley del efecto proporcional” donde el tamaño de la empresa en un determinado año queda expresado como:  $S_{t+1} = \lambda S_t$ . Posteriormente Kesten (1973) añade al modelo de Gibrat un término aleatorio, tal que el crecimiento de la empresa se expresa como  $S_{t+1} = \lambda_t S_t + \rho_t$ , en este caso el proceso de crecimiento también nos dirige hacia distribuciones de ley potencial

de tiempo suficientemente amplio, las tasas de crecimiento se distribuyen como una log-normal. Si consideramos que todas las empresas nacen aproximadamente con el mismo tamaño inicial, entonces la distribución del tamaño de las empresas también es una log-normal, y la predicción del modelo de Gibrat es aproximadamente correcta.

Desde que Gibrat publicó su trabajo a principios de los años treinta, es necesario esperar, prácticamente, hasta la década de los 60 para que la distribución del tamaño de las empresas vuelva a aparecer en las publicaciones científicas. En 1958 Simon y Bonini publican el trabajo titulado *Skew distribution of bussines firm*, donde a partir de un modelo inspirado en el trabajo de Gibrat los autores muestran que la distribución del tamaño de las empresas en Estados Unidos es altamente asimétrica. Este trabajo más otros que exploran las distribuciones asimétricas son recopilados en un libro publicado en 1977 por Simon y sus co-autores y titulado *Skew distributions and the size distributions of bussines firms*.

El objetivo de estos trabajos fue doble: por un lado, presentar una teoría general para dar cuenta de la persistencia de las distribuciones asimétricas, concretamente las llamadas distribuciones rango-tamaño, y por otro, aplicar la teoría y determinar sus implicaciones en cuanto al diseño y efectividad de la política económica, Ijiri y Simon (1977, p.3). Para los autores, la existencia de una misma regularidad que aparece en diversos fenómenos, no teniendo entre estos un mecanismo común evidente, puede intentar ser explicada a través de enfoques que trabajen a partir de leyes de probabilidad. Así, los modelos teóricos examinados son modelos estocásticos que producen la distribución del tamaño de las empresas observada en el estado estable. Estos investigadores analizan el tipo de distribuciones que pueden englobarse dentro de las llamadas distribuciones rango-tamaño como la de Pareto, donde la relación entre la frecuencia acumulada y el rango es lineal en una escala logarítmica. Además, demuestran que una distribución que se aproxima a la de Pareto en su pico alto es la distribución de Yule. En resumen, el trabajo de este grupo se orientará, principalmente, a buscar modelos estocásticos que generen en el estado estable dos tipos de funciones, la



distribución log-normal y la distribución de Yule, ambas distribuciones asimétricas que, en un principio, parecen ajustar los datos razonablemente.

Los trabajos en esta línea establecen, para cada modelo estocástico, determinados supuestos particulares con una probabilidad asociada a sus procesos básicos. El reto crucial en estos modelos pasa por encontrar los supuestos apropiados que cumplan dos condiciones: en primer lugar deben ser capaces de producir en equilibrio una distribución que se asemeje a las observadas empíricamente –como por ejemplo las distribuciones de Yule y log normal– y en segundo lugar, los supuestos subyacentes del modelo deben proporcionar un mecanismo explicatorio razonable para el fenómeno. El cumplimiento de la primera condición, la aparición de las distribuciones asimétricas antes mencionadas se obtiene al considerar la hipótesis de Gibrat (ley del efecto proporcional). Para que se cumpla la segunda condición es necesario encontrar alguna interpretación razonable que explique porque se produce ese comportamiento en el crecimiento.<sup>6</sup>

En el modelo de Simon y Bonini (1958, p.140-142), el tamaño no tiene ningún efecto sobre la tasa esperada de crecimiento de la empresa, esta premisa se formaliza a partir de una reformulación de la hipótesis de Gibrat. Establecen que la distribución de la tasa de cambio en el tamaño durante un año es la misma para todas las clases de tamaño consideradas. Es decir aplica la misma distribución de probabilidad de la tasa de crecimiento para cada clase de tamaño o intervalo de tamaños. La segunda premisa añadida por Simon y Bonini establece que cada periodo nuevas empresas se incorporan al mercado, nacerán con el tamaño mínimo y crecerán a una tasa relativamente constante.

---

6. En el trabajo de Simon y Bonini (1958), las interpretaciones consistentes con un crecimiento de la empresa proporcional a su tamaño pasan por considerar la existencia de rendimientos constantes de escala donde la rentabilidad de la empresa es independiente de su tamaño de partida, bajo este supuesto es de esperar que las tasas de crecimiento de las empresas sean independientes de su tamaño, en concordancia con la ley de Gibrat.

En resumen, Simon y sus co-autores (1955, 1958) predicen que el cumplimiento de la ley de Gibrat nos lleva a distribuciones asimétricas del tipo Yule o Pareto. Además realizan varios estudios empíricos sobre poblaciones de grandes empresas estadounidenses en los que demuestran que las distribuciones teóricas obtenidas son una buena aproximación de la distribución real del tamaño de las empresas manufactureras.

El modelo de Simon y Bonini (1958) permite superar la limitación del modelo de Gibrat, pues la evidencia empírica no apoya la premisa del crecimiento proporcional tal y como Gibrat la expone. Si bien, Simon mantiene la existencia de algún tipo de proporcionalidad en el crecimiento (al considerar que el crecimiento es proporcional para cada clase de tamaño), no considera que el crecimiento sea proporcional al tamaño de cada empresa.

Muchos trabajos publicados años más tarde se centraron en contrastar la validez de las premisas de Gibrat. Los resultados obtenidos no han sido del todo concluyentes, aunque la balanza se inclina hacia la no validez de cada una de las premisas y por tanto del modelo.

Axtell (2001) señala que el modelo de Gibrat se apoya en las siguientes premisas:

1. La tasa de crecimiento de una empresa es independiente de su tamaño (ley del efecto proporcional).
2. Las sucesivas tasas de crecimiento de una empresa no están correlacionadas en el tiempo.
3. Las empresas no interactúan.

Los resultados empíricos de muchos trabajos conducen a rechazar la validez de cada una de las tres premisas anteriores. Las razones del rechazo de la tercera de ellas es evidente para cualquiera: las empresas interactúan unas con otras de formas diversas: son demandantes de factores de producción de otras empresas, oferentes de sus productos finales a otras, tienen competidores, aliados estratégicos, se producen fusiones, y adquisiciones. Desde sus orígenes, la microeconomía incorporó la interacción de empresas en los mercados: la economía neoclásica predice que en un mercado de competencia perfecta las

empresas se orientarán hacia la minimización de los costes, que vendrá provocada por la competencia que se establecerá entre las empresas. La Teoría del Oligopolio establece que la interdependencia estratégica es una característica fundamental de este tipo de mercados, y la Teoría de Juegos se centra directamente en analizar cómo son esas interacciones, por mencionar algunas de las teorías más relevantes.

En cuanto a la primera de las premisas a las que apunta Axtell: la tesis de Gibrat o ley del efecto proporcional, atrajo la atención de una extensa rama de la literatura estadística que se orientó directamente hacia la contrastación de la relación ente el tamaño de la empresa y su crecimiento. Los resultados de las investigaciones realizadas no han sido concluyentes a favor del cumplimiento de la ley, siembran la duda acerca de la idea de una relación o causalidad entre el tamaño y el crecimiento de la empresa. La ley de Gibrat, –crecimiento proporcional, en sentido estricto– no parece tener sentido, sin embargo no emergen caracterizaciones alternativas claras. Algunos de los trabajos más importantes que se han dedicado a contrastar la relación entre el crecimiento y el tamaño de las empresas han sido, Hart and Prais (1956), Mansfield (1962), Singh y Wittington (1975), Leonard (1986), Evans (1987 ), Hall (1987), Dunne y Hughes (1994), Amaral et al (1997), Hart y Oulton (1999) o Fariñas y Moreno (2000) entre otros<sup>7</sup>.

Singh y Wittington<sup>8</sup> (1975) observaron que las fluctuaciones de la tasa de crecimiento, medidas por la desviación estándar  $\sigma_1(S)$ , declinan a medida que aumenta el tamaño de la empresa. Este comportamiento del crecimiento de las empresas no era un hecho sorprendente pues se considera que las empresas de mayor tamaño tienden a estar más diversificadas, lo que las lleva a ser más estables. La relación entre las fluctuaciones en el crecimiento y el tamaño de las

---

7. Singh y Wittington (1975) partiendo de los activos de la empresa como medida del tamaño, observan que la tasa media de crecimiento crece ligeramente respecto al tamaño de la empresa. Sin embargo, el trabajo de Evans (1987) y Hall (1987), utiliza el número de empleados para definir el tamaño y sugieren que la tasa media de crecimiento disminuye con el tamaño. Dune y Hughes (1994) llegan a la conclusión de que la tasa media de crecimiento está siempre inversamente relacionada con el tamaño de la empresa.

8. Citado en Amaral et al (1997).

empresas se convertirá, tres décadas más tarde, en foco de interés de muchos trabajos estadísticos no sólo en el campo de la economía, Amaral et al (1997, 2001). La distribución de las fluctuaciones en el crecimiento de un suceso o variable -como el tamaño- en una población, también será objeto de estudio en diversos campos, considerándose una característica de ciertos sistemas complejos.

La segunda premisa de Gibrat, sometida a prueba, es la no correlación en el tiempo de las tasa de crecimiento de las empresas. Los resultados empíricos de la literatura no son concluyentes: Singh y Whittington si encuentran ciertas correlaciones; Hall (1987), sin embargo, obtiene resultados contrarios. También se ha sugerido una posibilidad de correlación negativa.

Otra crítica al modelo de Gibrat proviene de Amaral et al (1997), cuyo trabajo analiza la estabilidad de la distribución del tamaño de las empresas. La evidencia empírica muestra que la distribución ha sido estable a lo largo del periodo estudiado, pero esta estabilidad contradice la validez del modelo de Gibrat. Si según éste, el tamaño de una empresa depende del tamaño del año anterior más un componente aleatorio, la varianza de la distribución crecería de forma ilimitada a lo largo del periodo de tiempo estudiado. Pero Amaral y sus coautores no obtienen estos resultados, y por ello, concluyen que posiblemente puedan existir otros factores, aún no descubiertos, que puedan explicar la distribución observada. Deben existir otros aspectos no incluidos en las premisas de Gibrat que jueguen un importante papel.

Aunque el modelo de Gibrat ha sido un importante referente para trabajos posteriores, Sutton (1997) afirma que no hay una racionalidad evidente en él como para establecer alguna relación de tipo general entre el tamaño de las empresas y su índice esperado de crecimiento. Más allá, no hay ninguna razón para esperar que la distribución del tamaño de las empresas tome alguna forma particular para las diversas industrias. En tiempos más recientes, muchos autores sólo pretenden demostrar que la distribución es asimétrica, pero no tratan de

explicar la extensión de la asimetría o la forma particular que la distribución del tamaño puede tomar.

En cierta forma, los trabajos de Simon y sus co-autores fracasaron en el objetivo de encontrar funciones de distribución teóricas de probabilidad que se adaptasen a la distribución empírica del tamaño de las empresas. Puede decirse que existen varios tipos de distribuciones teóricas que ajustan, razonablemente bien, diferentes partes de la distribución real como la log-normal; sin embargo, estas distribuciones no parecen presentar ninguna ventaja frente al importante ajuste de los datos a la ley potencial, rango-tamaño, o ley de Zipf.

La búsqueda de distribuciones teóricas fue con el tiempo abandonada por otra, en la cual se propone la utilización de distribuciones rango-tamaño para analizar la evolución de la distribución del tamaño de las empresas a lo largo del tiempo. El trabajo de Simon y sus co-autores titulado: *Effects of Mergers and Acquisitions on Business Firm Concentration*<sup>9</sup>, publicado por primera vez en 1971, trata de constatar aspectos como la evolución del grado de concentración en un sector y el efecto que sobre éste tienen las fusiones y adquisiciones a través de la regla rango-tamaño. Los autores parten de una distribución del tamaño donde la relación entre el tamaño de la empresa puede expresarse de forma aproximada a la distribución:  $sr^\beta = M$ ; siendo  $s$  el tamaño de cada empresa de la población, y  $M$  y  $r$  constantes (Ley de Pareto) Tomando logaritmos:  $\log s = \log M - \beta \log r$ . Concluyen que la ley rango-tamaño es robusta, aún en presencia de importantes procesos de fusiones y adquisiciones. En general, podemos afirmar que los modelos inspirados en estos trabajos tratan de explicar la regularidad llamada rango-tamaño a partir de modelos estocásticos.

Durante la década de los 80 no parece que los trabajos de Simon y sus co-autores hayan tenido continuidad, la distribución del tamaño de las empresas y la regla rango-tamaño no parecen interesar de forma especial a los investigadores;

---

9. H.A. Simon y Y. Ijiry (1971): *Effects of Mergers and Acquisitions on Business Firm Concentration. Journal of Political Economy* n° 79, pp.314-322. Reeditado en Ijiry y Simon (1977), cap 10.

los trabajos que se ocupan del tamaño de las empresas se centran en analizar y contrastar ciertas regularidades que aparecen en distintas poblaciones de empresas, por ejemplo el grado de turbulencia en un sector –medido por la cantidad de empresas que entran y salen del mercado– o el llamado efecto “shakeout”, también se aborda la relación entre edad, tamaño y supervivencia, Sutton (1997).

En todo caso, los trabajos que han intentado analizar la distribución del tamaño de las empresas desde enfoques estadísticos, siempre han sido criticados por su falta de contenido económico. Las premisas estocásticas no son suficientes para obtener una explicación satisfactoria de por qué las empresas en su distribución del tamaño exhiben esta conducta potencial. A estos modelos les falta una argumentación que explique la viabilidad y coherencia de sus supuestos o premisas sobre el comportamiento de las variables implicadas en el proceso.

A lo largo de este capítulo hemos realizado una revisión de cómo la investigación ha ido abordado la cuestión de la distribución del tamaño de las empresas. Ya en los dos primeros trabajos que contrastaron empíricamente la distribución –Gibrat(1931) y Zipf(1949)– se observó el carácter asimétrico de ésta; con el tiempo y especialmente debido a los trabajos de Simon y sus co-autores se tomó conciencia de que la distribución se comportaba como una ley potencial también conocida como regla *rango-tamaño*.

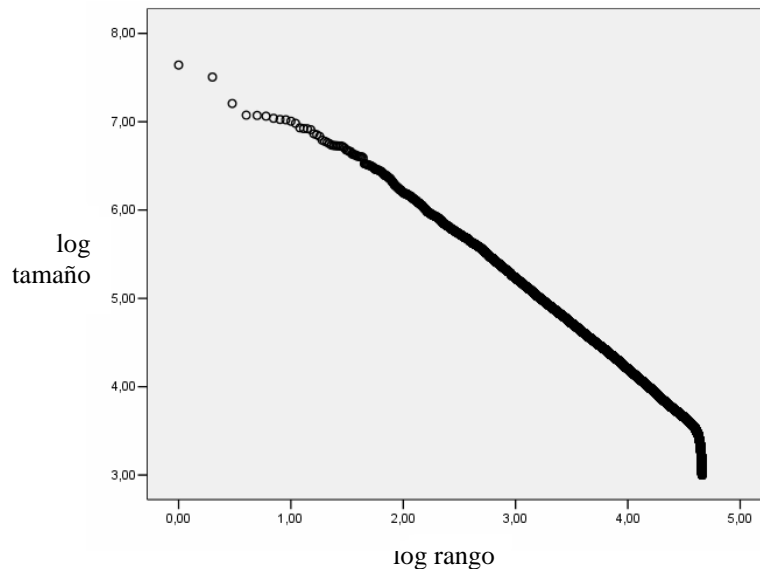
#### **1.4. LA LEY POTENCIAL PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS**

Llegados a este punto, parece adecuado mostrar qué resultados arroja la evidencia empírica para las empresas españolas. Al igual que ya se ha contrastado para otros países como: Japón, Estados Unidos o diversos países de la Unión Europea, la distribución del tamaño de las empresas en nuestro país se ajusta a una ley potencial. Para la obtención de la información hemos utilizado la base de datos SABI (Sistema Anual de Balances Ibéricos) aproximado el tamaño a partir de los ingresos de explotación.

La población esta formada por 45.862 empresas, todas aquellas empresas de la base cuyos ingresos alcanzan al menos 1 millón euros. Ordenamos las empresas de mayor a menor ingreso; le asignamos a cada empresa un rango y representamos ambas variables en términos de logaritmos. En la figura 1.3. se puede observar como los datos se ajustan a una línea recta descendente, lo que demuestra que la distribución del tamaño de las empresas cumple la regla *rango-tamaño*. Los datos representados en la figura 1.3. se ajustan a la recta de regresión:

$$y = -1,049x + 8,380$$

siendo “y” el logaritmo de los ingresos y “x” el logaritmo del rango con una bondad del ajuste extremadamente buena pues el coeficiente de regresión alcanza un valor  $R^2 = 0,999$ .



Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por SABI.

**Figura 1.3. La ley rango-tamaño para las empresas españolas en el año 2001.  
El tamaño se ha aproximado por los ingresos de explotación.**

## **CAPÍTULO 2.**

# **LEYES POTENCIALES EN SISTEMAS NATURALES Y SOCIALES**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Existe una amplia evidencia empírica que avala la presencia de leyes potenciales en sistemas físicos, químicos, biológicos, sociales y económicos. Estas leyes, lejos de ser una rareza, son ubicuas, una gran diversidad de fenómenos se ajustan a este comportamiento. En las páginas siguientes realizaremos un breve repaso de los principales fenómenos cuya conducta se ajusta a las funciones potenciales, mostrando especial interés por aquellos de carácter económico. Terminaremos esta sección mostrando los resultados que arrojan los trabajos empíricos sobre la distribución del tamaño de las empresas.

Sabemos que los fenómenos que se distribuyen de acuerdo a una ley potencial tienen una distribución de sucesos claramente asimétrica y característica: los sucesos de gran magnitud aparecen poco frecuentemente mientras que los sucesos de pequeña intensidad son muy abundantes. Como vimos en el capítulo anterior, la existencia de una ley potencial implica que podemos establecer una relación clara entre la frecuencia de aparición de un evento y su tamaño, de manera que la frecuencia de aparición depende inversamente del tamaño elevado a una potencia. Si designamos a  $x$  como el tamaño del evento y  $P[X>x]$  a la probabilidad de aparición de un evento con un tamaño superior a  $x$ , podemos decir que:  $P[X>x] \sim x^{-\beta}$ . Siendo  $\beta$  el exponente de



escalamiento<sup>10</sup>. Es importante recordar que cuando los datos se ajustan a la expresión anterior la representación de ambas variables: la probabilidad de aparición y el tamaño, en términos logarítmicos, se ajusta a una línea recta.

## 2.2. LA UBICUIDAD DE LAS LEYES POTENCIALES

Una de las características de las leyes potenciales que más llama la atención es su frecuente aparición en fenómenos muy diversos, tanto en fenómenos en el campo de las ciencias de la naturaleza como en las ciencias sociales. La conducta potencial aparece en la intensidad de los terremotos, la extinción de las especies, la distribución del tamaño de las ciudades, la estructura de las lenguas, la organización de Internet, la fluctuaciones en el precio de las acciones y por supuesto en la cuestión central de este trabajo la distribución del tamaño de las empresas. En las páginas siguientes realizaremos un breve repaso sobre fenómenos muy diversos que obedecen a una ley potencial<sup>11</sup>.

### *La lingüística*

En el capítulo precedente hemos dejado constancia de la observación empírica de distribuciones de ley potencial para la frecuencia de aparición de las palabras en el lenguaje, donde la frecuencia de aparición ( $f$ ) se relaciona inversamente con su rango ( $r$ ). A partir de los trabajos iniciales de Zipf

---

10. Nombre que recibe en la física estadística

11. A lo largo diversa literatura empírica se utilizan distintas funciones para expresar este tipo de comportamientos. En unos casos se relaciona la frecuencia de aparición de un evento en función de su tamaño; en otros se utiliza la frecuencia acumulada respecto al tamaño y también la frecuencia de aparición de un evento respecto a su rango. En cualquier caso, cuando los datos tomados en términos logarítmicos se ajustan a una línea recta sabemos que existe conducta de ley potencial. Cierta literatura empírica especialmente la de la física estadística denomina representaciones Zipf a aquellas que relacionan el valor de una variable respecto a su rango, en términos logarítmicos, Amaral (1997, p.453).

(1949,1972, p.23), sobre la frecuencia de aparición de las palabras en el *Ulises* de Joyce, se realizarán muchos otros trabajos que demostrarán este comportamiento para gran cantidad de observaciones en diferentes tipos de textos, discursos y lenguas.

Podemos expresar la ley de Zipf de la siguiente forma:

$$f \sim r^{-\alpha}$$

donde  $\alpha$  es igual o muy próximo a 1 en su versión original.

De entre aquellos autores que siguieron a Zipf destaca Mandelbrot, quién, en la parte final de su tesis doctoral, trata de profundizar en los trabajos matemáticos en psicolingüística y lingüística estadística tratando de explicar la ley Zipf. Como él afirma: «A muchos matemáticos este tópico de investigación les hubiese parecido cuanto menos una chifladura, pero yo vi en él una oportunidad de oro para convertirme en el Kepler de la lingüística estadística», Mandelbrot (1985, p.212)<sup>12</sup>. Llevó a cabo una generalización teórica de la ley de Zipf, con el objeto de abarcar casos más interesantes –por ejemplo el que la probabilidad de aparición de palabras más largas, o poco frecuentes, o muy rebuscadas, muy poco probables–, fuese más alta que la predicha por el modelo de decrecimiento lineal de la frecuencia a lo largo de los rangos.

Reformuló la ley<sup>13</sup> para crear otra que fuese capaz de abarcar el comportamiento de muchos más tipos de leyes potenciales y donde la ley de Zipf original aparece como un caso particular de su ley más general.

---

12. Citado en Izquierdo (1998, p.14).

13. Mandelbrot (1982, p.481) demostró que se puede obtener una ley potencial más general (casi la más general) sometiendo la ley de Zipf a dos modificaciones. La primera consiste en añadir una constante al rango, lo que da la secuencia:  $1/(1+\text{constante})$ ,  $1/(2+\text{constante})$ ,  $1/(3+\text{constante})$ ,  $1/(4+\text{constante})$ . La segunda consiste en añadirle una constante a la potencia. De manera que la secuencia nos quedaría:  $1/(1+\text{constante})^{1+\text{constante}}$ ,  $1/(2+\text{constante})^{1+\text{constante}}$ ,  $1/(3+\text{constante})^{1+\text{constante}}$ , y así sucesivamente. Aplicando estas modificaciones de Mandelbrot a la ley potencial inicial, la nueva distribución de ley potencial o ley de Zipf-Mandelbrot<sup>13</sup> puede expresarse como:  $T = K(r + V)^{1+\beta}$ . Siendo  $T$  el tamaño de la empresa, y el resto constantes o parámetros:  $V$  es la constante que se le añade al

### **Catástrofes**

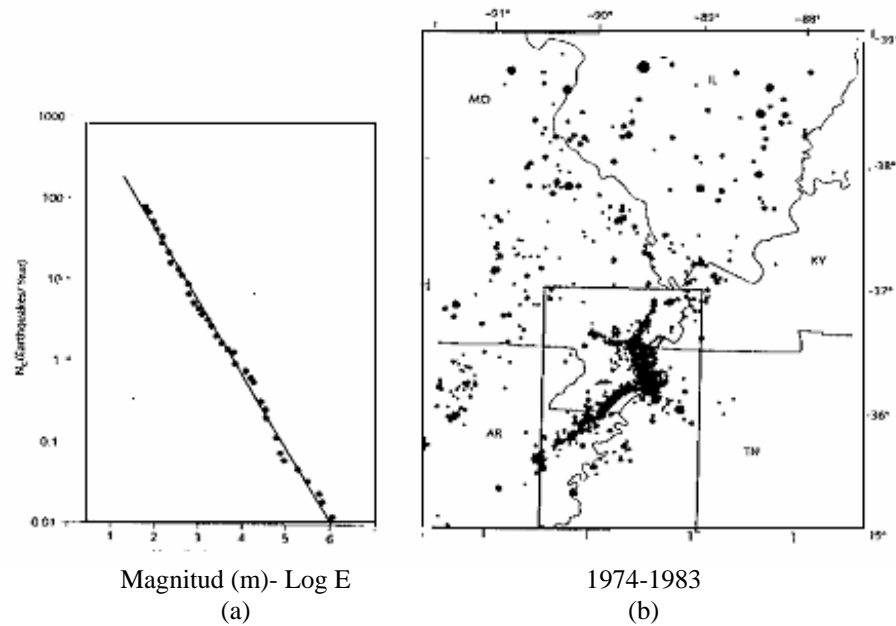
La ley Gutenberg-Richter nos dice que el número de terremotos y su intensidad sigue de forma robusta una sencilla función potencial donde la frecuencia de aparición de los terremotos está inversamente relacionada con la intensidad de estos. Por ejemplo se observa que a lo largo del tiempo, en una determinada zona se han producido sobre 1000 terremotos de magnitud 4 en la escala Richter, 100 terremotos de magnitud 5, 10 de magnitud 6 y así sucesivamente.

El ajuste de los datos sobre la distribución de la intensidad de los terremotos a la ley potencial demuestra que los terremotos de gran magnitud no juegan un especial papel; ellos siguen la misma ley que los terremotos de pequeña magnitud. Los físicos estudiosos de las leyes potenciales, como Bak (1996 p.13), señalan que no deberíamos tratar de encontrar explicaciones específicas para los terremotos de gran magnitud, y sí tener en cuenta la posible existencia de una teoría de carácter general que incorpore o recoja el movimiento de los terremotos de todo tipo de tamaño.

Los eventos catastróficos ocurren a algún intervalo medio, pero eso no significa que sean cíclicos. Por ejemplo, las guerras ocurren como media, se dice, cada 30 años, pero este dato no puede ser utilizado para prevenir una próxima guerra. La variación de estos intervalos es amplia y los valores medios no nos aportan demasiada información.

---

rango y  $\beta$  el exponente de la función. La ley de Zipf queda como un caso particular de la propuesta por Mandelbrot, para  $\beta$  y la constante  $V$  iguales a 0.



- (a) La línea recta nos indica la distribución potencial de los terremotos con una magnitud superior a  $m$ .
- (b) Representa la localización de los terremotos cuya intensidad ha sido representada en la primera gráfica.

Fuente: Bak (1996, p.13).

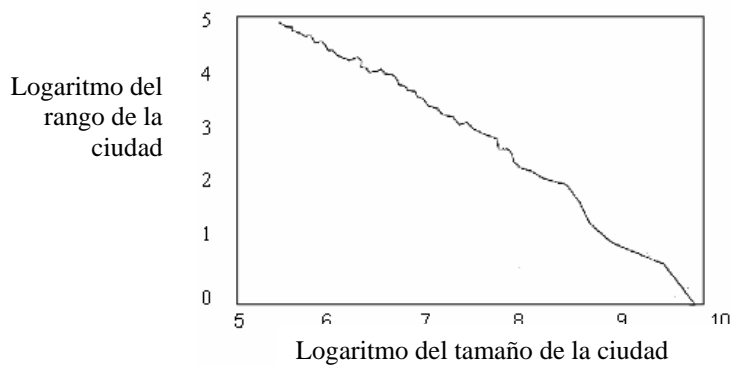
**Figura 2.1. Distribución de la magnitud de los terremotos en la zona de Nuevo Madrid, en el sudeste de Estados Unidos durante el periodo de 1974-1983.**

### ***La distribución del tamaño de las ciudades***

Como afirman Fujita et al (2000, p.211): «Desde hace setenta años por lo menos, se sabe que la distribución de las grandes ciudades de Estados Unidos está sorprendentemente muy bien descrita por una ley exponencial, según la cual el número de ciudades con una población mayor que  $S$  es aproximadamente proporcional a  $S^{-\alpha}$ , estando  $\alpha$  bastante próximo a 1». El primer trabajo que trata el

comportamiento potencial de la distribución del tamaño de las ciudades es el trabajo de Zipf, del año 49 ya referido en múltiples ocasiones. En él, recopila datos sobre los habitantes de distintas ciudades norteamericanas en el año 1920, sus resultados afirman que la distribución de los datos cumplen la regla rango-tamaño donde el tamaño de las ciudades está inversamente relacionado con su rango.

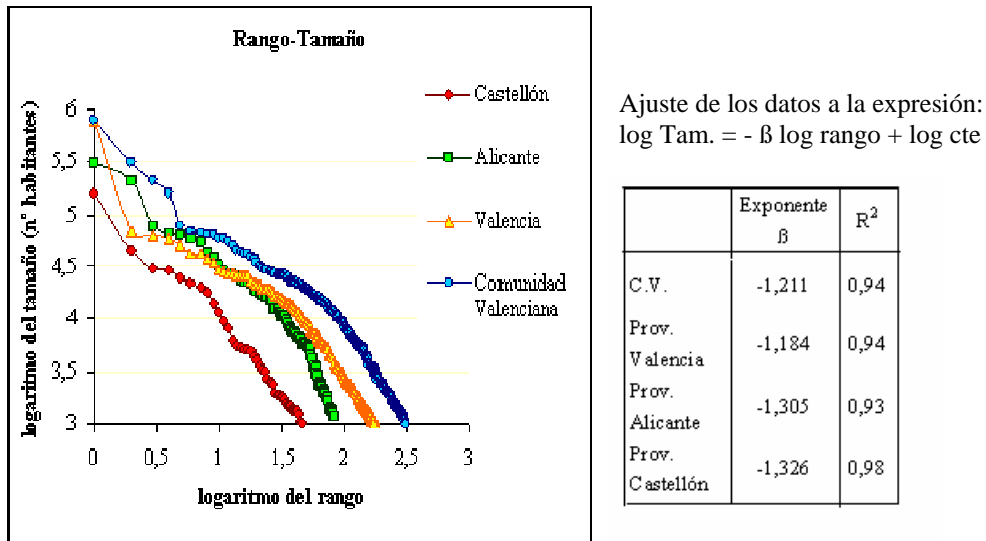
Para tener una idea de lo bien que funciona la ley, tengamos en cuenta que en Estados Unidos en 1991 había 40 áreas metropolitanas con más de un millón de habitantes, 20 con más de dos millones, y nueve con más de cuatro millones (Houston era demasiado pequeña). La figura 2.2. representa el logaritmo del tamaño del área metropolitana frente al logaritmo del rango (por ejemplo, Nueva York =1, Los Ángeles =2, etc.) para las 130 áreas metropolitanas incluidas en el *Statistical Abstract of the United States*. La gran linealidad de dicha figura y su pendiente de 45 grados son destacables, impresión visual que confirman los análisis estadísticos más formales, Fujita et al (2000, p.211).



Fuente: Fujita et al (2000, p.214)

**Figura 2.2. Tamaño en las ciudades en Estados Unidos.**

De los estudios realizados se deduce que durante el siglo pasado, en Estados Unidos la distribución de las ciudades por el tamaño ha estado muy bien descrita por la ley potencial. Harris Dobkins y Ioannides (2001) han reagrupado los datos históricos de este país desde 1900 sobre los “lugares urbanos” con los datos sobre las áreas metropolitanas, siguiendo más o menos las definiciones actuales, obteniendo que el exponente de dicha distribución siempre está próximo a 1.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por Fundación La Caixa: *Anuario Social de España 2004*.

**Figura. 2.3. La Regla Rango-Tamaño para las ciudades (poblaciones) de la Comunidad Valenciana. Año 2004.**

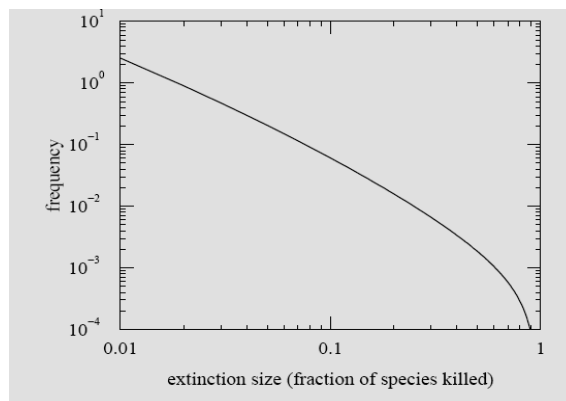
La conducta potencial en la distribución del tamaño de las ciudades es quizás uno de los descubrimientos de Zipf más conocidos. Con el tiempo se han ampliado los análisis a otros países y regiones, y actualmente, la literatura sobre

economía urbana reconoce el comportamiento potencial en la distribución del tamaño de las ciudades.

### ***Extinción de especies***

En el campo de la evolución biológica, los resultados de las investigaciones de Raup y Sepkoski<sup>14</sup> indican que la distribución de los eventos de extinción de las especies sigue una distribución donde los grandes eventos, como la extinción Cretácica de los dinosaurios y muchas otras especies, ocurren realmente con una probabilidad y regularidad bien definidas.

Los datos recogidos por Sepkoski provienen de fósiles de miles de especies marinas, él desarrolla la historia geológica en 150 periodos consecutivos de 4 millones de años. Para cada periodo, se estima la fracción de especies que desaparece respecto al periodo previo. Raup y Sepkoski contabilizaron el número de periodos en los cuales el número relativo de extinciones era al menos del 10 por cien, cuantos en los que la variación era entre el 10 y el 20 por cien, y así sucesivamente.



Fuente: Newman (1997)

***Figura 2.4. Distribución de las extinciones. Curva que representa los datos extraídos por Raup (1991) de los datos sobre fósiles suministrados por Sepkoski.***

---

14. Raup, D.M. y Sepkoski, J.J.(1984): *Periodicity of Extinctions in the Geological Past. Proceedings of the National Academy of Science, USA.* Citado en Bak (1996, p.16)

En muy pocos casos el número relativo de extinciones supera el 50 por cien y en un número muy elevado es de menos de un 5 por cien y parece que los eventos de extinción se ajustan bastante bien a las leyes potenciales.

### **2.3. MANDELBROT Y LAS DISTRIBUCIONES DE LEY POTENCIAL EN ECONOMÍA: LAS FLUCTUACIONES EN LOS PRECIOS**

Mandelbrot es quizás quién más ha contribuido en dar a conocer las leyes potenciales. Interesado por la aparición de este tipo de distribuciones en campos muy diversos, pronto se dedicó a investigar el cumplimiento de la ley en fenómenos económicos. Por otro lado, el desarrollo de la geometría fractal también parece haber jugado cierto papel en la difusión de éstas.

#### ***2.3.1. La distribución de los ingresos***

Los análisis estadísticos de distintos tipos de series temporales de fenómenos socioculturales y económicos realizados por Mandelbrot (el flujo de las palabras en las lenguas naturales, la distribución del ingreso económico en las sociedades capitalistas, la variación de los precios especulativos en los mercados financieros), han mostrado cómo la estructura estadística característica de la rítmica de estas y otras muchas actividades humanas colectivas, en las que “la historia importa a todos los niveles del fenómeno”, suele ser distribuciones compatibles con un comportamiento de ley potencial.

Uno de los pilares fundamentales del proyecto científico interdisciplinar de Mandelbrot son sus trabajos en el área de la ciencia económica. La llamada “distribución de rentas de Pareto” –ya destacada por Zipf–, era una cuestión controvertida en el campo de la teoría económica desde su aparición en el *Curse d'economie politique* (1896). Pareto –ingeniero, economista y sociólogo– había encontrado una distribución para las rentas que chocaba frontalmente con el comportamiento gaussiano clásico de la estadística social. En el caso de las rentas económicas la probabilidad de encontrar un individuo diez (o cien, o mil)



veces más rico que otro, no era en absoluto despreciable. En este último caso, el de las distribuciones de ley potencial no existe una escala o dimensión característica del conjunto, a diferencia de los comportamientos gaussianos, las distribuciones de ley potencial son *libres de escala*.

### 2.3.2. Los precios del algodón y cotizaciones bursátiles

Mandelbrot entre los años 1959 y 1961 realiza diversas investigaciones orientadas a la generación de modelos estocásticos que den lugar a la aparición de distribuciones hiperbólicas, Izquierdo (1998, p.19). En 1961, después de su aterrizaje definitivo en Estados Unidos, donde trabajó inicialmente en un centro de investigación de IBM y después en la Universidad de Harvard, tuvo un encuentro fortuito con los datos que había reunido un economista, Hendrik Houthakker. Se trataba de una serie temporal de datos de la cotización bursátil del precio del algodón en los mercados centralizados del Medio Oeste norteamericano a lo largo del último siglo. Este encuentro dará origen a un área de investigación fascinante, la modelización econométrica del sorprendente comportamiento de los precios especulativos en los mercados de inversiones y rentas financieras<sup>15</sup>.

En el estudio de la variación de los precios, Mandelbrot observó dos tipos de comportamiento estadístico que resultaban atípicos e inexplicables en el contexto de las directrices marcadas por la teoría probabilística clásica, basada en

---

15. Véanse Mandelbrot:

- (1963): *The Variation of Certain Speculative Prices*. *Journal of Business* nº36. [reproducido en P. Cootner (ed), *The Random Character of Stock Market Prices*, Cambridge, MA: MIT Press 1964, pp.307-332].
- (1963): *New Methods in Statistical Economics*. *Journal of Political Economy* nº 71, pp. 421-440.
- (1966): *Forecasts of Future Prices, Unbiased Markets, and "martingale" models*". *Journal of Business* nº39, pp.242-255.
- (1973): *Le syndrome de la variance infinie et ses rapports avec la discontinuité des prix*. *Economie appliquée* nº36, p.321-348.
- (1982-1997): *La geometría fractal de la naturaleza*. Capítulo 7, Barcelona, Tusquets.
- (1997): *Fractales, hasard et financer*. Paris: Flammarion.

la ley de los grandes números y el teorema “normal” del límite central. El primero de estos comportamientos atípicos observados lo llamó el “*efecto Noé*” –o síndrome de la discontinuidad de precios y varianza infinita– contradecía una creencia muy arraigada entre los analistas bursátiles que, desde el trabajo precursor de Bachelier, modelaban el comportamiento temporal de las rentas financieras en forma de “un paseo aleatorio”. En los modelos estadísticos heredados (de Bachelier) se postula que, aunque las variaciones logarítmicas sucesivas de los precios se producen en direcciones completamente impredecibles, lo hacen, en promedio, a velocidades constantes, a saltos homogéneos. La desviación respecto de la magnitud media está limitada según una relación de proporción inversa que la liga con la amplitud del intervalo temporal. Sin embargo, las observaciones derivadas de los trabajos de Mandelbrot hacían rechazar los planteamientos bachelianos pues, como en el Diluvio Universal padecido por Noé, ciertos “acontecimientos” bursátiles ocurren de golpe y barren todo a su paso: los precios viajan a veces en el tiempo a saltos discontinuos que son mucho mayores de lo que deberían si su dinámica estuviese regida por las leyes completamente democráticas del movimiento browniano. La enseñanza principal del “efecto Noé” es la de la inestabilidad esencial, propiamente histórica, de toda estructura (física, biológica o cultural) tenida por estacionaria.

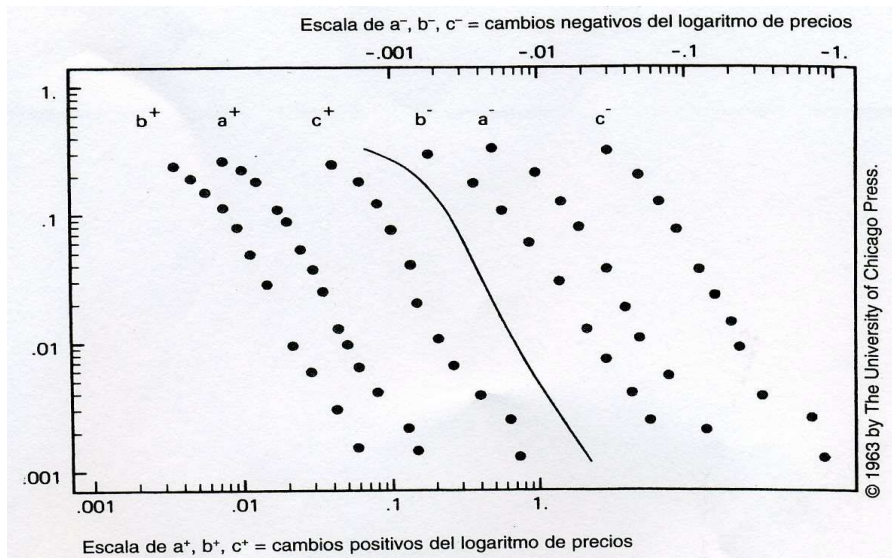
El segundo efecto postulado: el “*efecto José*” contradecía el principio de la independencia temporal a largo plazo de las series económicas, postulado por la teoría econométrica ortodoxa, Mandelbrot (1973, p.354 y ss). La econometría financiera al uso, sobre todo a partir de la aparición de los modelos neoclásicos de expectativas racionales, sólo admite la existencia de mínimos fenómenos de memoria a corto plazo en las series temporales, bajo la forma de correlaciones seriales de pequeña escala (conocido como “dependencia markoviana”). Sin embargo como en el sueño bíblico de José y el sueño del faraón con las siete vacas gordas (los siete años de abundancia) y las siete vacas flacas (los siete años de escasez), existía en las series temporales de precios financieros una clara continuidad e interpenetración indiscernible entre pequeñas tendencias cotidianas y grandes patrones estadísticos de cambio histórico sostenido, Izquierdo (1998, p.24).

El mensaje del efecto José es exactamente el mismo que el del efecto Noé solo que visto desde otro ángulo, a saber: la crítica radical al principio científico clásico de causalidad estable y discernible. Del mismo modo que todo equilibrio aparente acaba disuelto por un gran “Diluvio Universal” (Noé), la sospechosa duración de los periodos de vacas flacas y vacas gordas no tiene más entidad sustantiva que la pura causalidad *hiperbólica*, Izquierdo (1998, p. 25). No hay ninguna causa que relacione siete periodos de crecimiento con siete de decrecimiento, simplemente sabemos que hay fluctuaciones de todos los tamaños que son consistentes con muchísimos tipos de dinámica.

Según el modelo neoclásico de mercados eficientes de capital, los precios pueden fluctuar de forma imprevisible en el corto plazo por causa de la especulación racional. Mientras que el comportamiento a largo plazo debería estar gobernado por las leyes construidas por la microeconomía neoclásica, o bien exógenamente, por las macrotendencias institucionales y los avatares imprevisibles de la historia (guerras, epidemias, desastres naturales, revoluciones tecnológicas y demográficas...). De este modo, paradójicamente, la tendencia global a largo plazo de cualquier “novedad” o perturbación incontrolable, que surja a lo largo del proceso económico es la de irse agregando hacia un mismo estado (atractor) nivelador de diferencias. Sin embargo en los diagramas estadísticos de Mandelbrot no se observaba una ruptura abrupta entre las diversas escalas temporales del proceso. Muy al contrario, los gráficos de cotizaciones bursátiles mostraban una clara continuidad –aperiódica– entre el corto y el largo plazo, traducida como *autosemejanza estadística* entre las distintas distribuciones de frecuencias muestrales para escalas temporales diferentes. El aspecto visual de las gráficas comprimidas a la escala logarítmica de la evolución de los precios del día era asombrosamente parecido al de las gráficas de los precios del mes, de los precios del año, del decenio y del siglo.

Mandelbrot (1963) descubre un *principio escalante* en la variación de los precios: cuando  $X(t)$  es un precio,  $\log X(t)$  tiene la propiedad de que su incremento a lo largo de un intervalo de tiempo arbitrario,  $\log X(t+d) - \log X(t)$ , tiene una distribución independiente de  $d$ , aparte de un factor de escala. Si se

copia la lámina de la figura 2.5. en una transparencia y se desliza horizontalmente, se verá como la curva teórica se superpone a cualquier otra de las gráficas empíricas con ligeras diferencias respecto a la forma general. Esto es según Mandelbrot (1997, p.475) lo que postula su principio escalante.



Se han representado los siguientes conjuntos de datos, tratando por separado los valores positivos y negativos de  $X$ .

(a)  $X = \log_e Z(t+1 \text{ día}) - \log_e Z(t)$ , siendo  $Z$  el precio de cierre diario en la lonja de algodón de Nueva York, 1900-1905 (datos suministrados por el Departamento de Agricultura de los EEUU).

(b)  $X = \log_e Z(t+1 \text{ día}) - \log_e Z(t)$ , donde  $Z(t)$  es un índice de los precios diarios del precio del algodón en varias lonjas de los EEUU, 1944-1958 (comunicado por Hendrik s. Houthakker).

(c)  $X = \log_e Z(t+1 \text{ mes}) - \log_e Z(t)$ , siendo el precio de cierre en el día 15 de cada mes en la lonja de algodón de Nueva York, 1880-1940 (comunicado por el Departamento de Agricultura de los EEUU).

Fuente: Mandelbrot (1997, p.475), reproducido de Mandelbrot, B. (1963):  
*The Variation of Certain Speculative Prices.*

**Figura 2.5. Indicios originales de la invarianza por cambio de escala en economía. Fluctuaciones en los precios del algodón.**

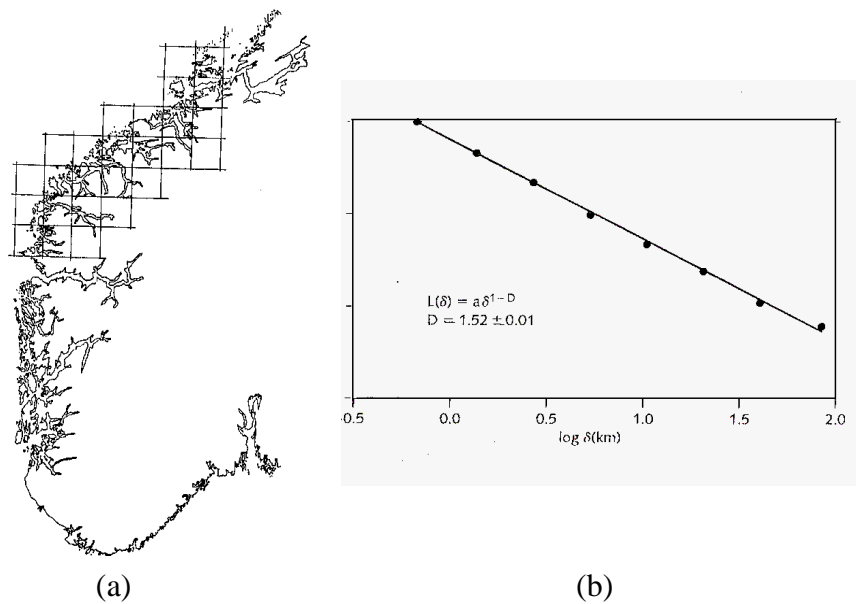
La distribución de las fluctuaciones en los precios mantiene la misma estructura para diferentes periodos de tiempo. La distribución de las fluctuaciones en un mes es similar a la de un día, en este sentido, existe una autosemejanza en el comportamiento estadístico de las fluctuaciones. Si miramos la forma en que se comportan los precios mes a mes y luego centramos nuestra visión en una pequeña parte de la distribución de datos, de manera que incrementamos el grado de resolución, observando el intervalo más detalladamente, por ejemplo las variaciones día a día de una parte del intervalo inicial, comprobaremos que el comportamiento de estas fluctuaciones es similar en ambos casos, existe *invarianza por cambio de escala*. Esta es una característica de las distribuciones de ley potencial que también está presente en los fractales.

### 2.3.3. Leyes potenciales y fractalidad

Cuando un sistema sigue una ley de escala, o ley potencial se ha dicho que sus propiedades se hacen *independientes de la escala de observación*. «No es únicamente la estructura geométrica la que posee leyes de escala (caso en el que hablamos de fractales) sino que también la ocurrencia temporal de algunos fenómenos puede ser invariante bajo cambios de escala (hablamos entonces de ruido  $1/f^\beta$ )», Solé y Manrubia (1996 p.305.).

Para Mandelbrot (1997, p.447) las distribuciones de probabilidad hiperbólicas, equivalentes a las leyes potenciales, son parientes muy cercanos de los fractales. Una de las características fundamentales de los fractales es su estructura autosimilar, y por lo tanto la *invarianza de escala*. Los objetos fractales presentan la misma estructura a diferentes niveles de proximidad en la observación de los datos. Por ejemplo, como muestra la figura 2.6., en el caso de que tratemos de medir la longitud de una costa, ésta dependerá de la escala de medición utilizada, de manera que cuanto menor sea la escala de medición mayor será la longitud. Además, se puede establecer una relación concreta entre la longitud de la costa y la escala de medición: la longitud depende inversamente de la escala elevada a una potencia. De manera que Mandelbrot pone de manifiesto que en la estructura de los fractales existe un comportamiento de ley potencial.

Mandelbrot puso en evidencia la estructura fractal de los paisajes. Uno de los ejemplos más conocidos para introducir a los interesados en la geometría fractal es el de la longitud de una costa. La geometría de una costa es complicada, pero su estructura presenta también un alto grado de orden. Aunque los mapas dibujados a distintas escalas difieran en sus detalles concretos comparten las mismas características genéricas. Es bastante cierto que, aparte de la escala, los pequeños y grandes detalles de las costas son geoméricamente idénticos. Cuando cada trozo de una cierta figura es geoméricamente semejante al todo, se dice que tanto la figura como la cascada que produce son *autosemejantes*.



- (a) La costa de Noruega, en ella se percibe el comportamiento fractal con fiordos dentro de fiordos y estos a su vez pertenecientes a otros fiordos y así sucesivamente.
- (b) L representa la longitud de la costa medida a partir de un encaje de cuadros como se muestra en la figura (a), para distintas escalas de medida,  $\delta$ . La línea recta nos indica que la costa es fractal. La pendiente de la línea, es  $D=1,52$ .

Fuente: Bak (1996, pp.20,21)

**Figura 2.6. Geometría fractal en la naturaleza**

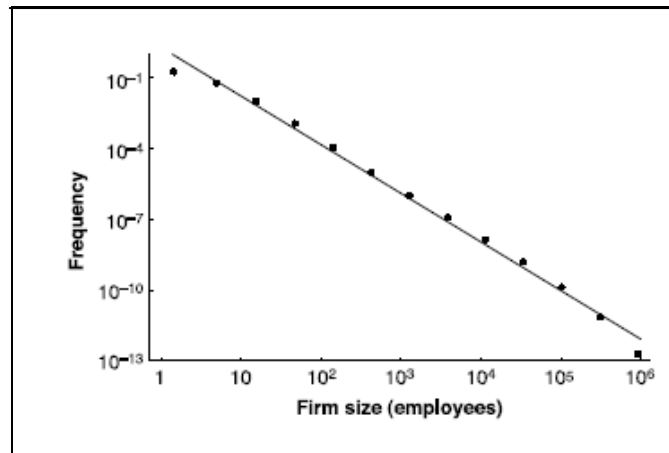
#### 2.4. LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS

Como vimos en el capítulo 1, es conocido que la distribución del tamaño de las empresas es altamente asimétrica hacia la derecha, y sabemos que los estudios estadísticos, generalmente, han atribuido este comportamiento a la “ley del efecto proporcional”. La investigación posterior ha tenido sombras y ha generado muchas dudas tanto de la verdadera naturaleza de este hecho estilizado como de su explicación. Independientemente de la idoneidad de la hipótesis del crecimiento proporcional y de los resultados obtenidos, autores como Sutton (1997) argumentan la falta de profundidad –en contenido económico– de los modelos basados en puros procesos aleatorios.

La literatura empírica ha intentado realizar generalizaciones sobre la forma de la distribución del tamaño de las empresas pero ha fracasado, sin embargo, parece ser que las distribuciones de ley potencial resultan un buen ajuste para los datos empíricos encontrados. Las investigaciones muestran además que el exponente de escalamiento está próximo a 1 en muchos casos. En el caso de las empresas estadounidenses sabemos que Zipf (1949) demostró el cumplimiento de la regla rango-tamaño en los años 30; más tarde los trabajos de Ijiry y Simon (1977), desarrollados a lo largo de casi dos décadas, son consistentes con los resultados de Zipf; más allá, Axtell (2001, p. 1818) a partir de la población de empresas de 1997 corrobora el ajuste de los datos sobre tamaño de las empresas a la función potencial. Avanza en una conjetura comprobable: la distribución de Zipf puede mantenerse para empresas de otros países, invitando al desarrollo de nueva evidencia dada la actual disponibilidad de amplias fuentes de datos.

Históricamente, el análisis del tamaño de las empresas ha utilizado información procedente de muestras donde los datos de pequeñas empresas eran limitados. Los estudios realizados concluían que la distribución *log-normal* era la que proporcionaba un mejor ajuste. Axtell (2001, p.1818), utiliza datos del *U.S Census Bureau* para el año 1997, esta base contiene el total de empresas (que contribuyen fiscalmente) en Estados Unidos y que tienen empleo a lo largo de

ese año, siendo aproximadamente de 5,5 millones el número de empresas que proporcionan información. Los datos muestran que el tamaño de las empresas se ajusta a la ley de Zipf: la probabilidad de que una empresa sea mayor a un determinado tamaño  $s$  es inversamente proporcional a dicho tamaño.



Los datos han sido obtenidos del U.S. Census Bureau, tabulados en clases de tamaños que crecen en potencias de tres. La línea continua es la regresión lineal aplicada a los datos, y tiene una pendiente de 2,059 y un ajuste  $R^2 = 0,992$ .

Siendo  $\alpha = 1,059$  el exponente de la función de distribución acumulada

$$P_r[S \geq s_i] = \left( \frac{s_0}{s_i} \right)^\alpha, s_i \geq s_0, \alpha > 0. \text{ El número de empresas es de } 5.541.918.$$

Fuente: Axtell (2001, p.1819).

***Figura 2.7. La regla rango-tamaño para la distribución del tamaño de las empresas estadounidenses. Año 1997.***

En el estudio de la distribución del tamaño de las empresas es necesario hacer referencia a los trabajos realizados desde la física, concretamente por una rama de ésta conocida como física estadística que ha tenido importantes éxitos en la explicaciones del comportamiento colectivo de grandes conglomerados de partículas. En los últimos años muchos físicos han comenzado a trabajar dentro



del campo de la economía, especialmente en finanzas, el nuevo campo de estudio ha sido acuñado por éstos con el término de *Econofísica*<sup>16</sup> y recoge su particular visión acerca de los fenómenos económicos, así como el conjunto de métodos para investigarlos, Mansilla (2003, p.12). Existen dos razones fundamentales para que esta fusión entre la física y la economía se haya desarrollado. Una de ellas puede ser el deterioro en el mercado de trabajo académico para los físicos, esto los ha llevado, en gran número, a las instituciones financieras, quienes los contratan por su sólida formación matemática y habilidad en el uso de ordenadores. Son buscados para desarrollar nuevos y sofisticados productos financieros y para el desarrollo de técnicas de análisis de grandes masas de datos provenientes de series de precios de los mercados. La segunda motivación que lleva a los físicos a interesarse por las cuestiones económicas es de carácter más científico. La física estadística ha estado tradicionalmente involucrada con sistemas de gran número de partículas esto, unido a la abundante cantidad de datos económicos que proporcionan las numerosas fuentes de datos existentes, explica ampliamente el interés de los físicos estadísticos por aplicar sus técnicas al estudio de fenómenos económicos.

Actualmente, la actividad de los físicos en la investigación de fenómenos económicos ha dejado de ser episódica y una comunidad científica con características propias ha comenzado a emerger. Mansilla (2003, p.13) va más allá al afirmar que la econofísica se ha configurado como una nueva área de investigación interdisciplinaria con sus propios objetivos de estudio, sus técnicas particulares de investigación y su propia comunidad científica. Esta vertiente de investigación propone una mejor comprensión de los procesos económicos basada en la descripción del comportamiento adaptativo de los agentes frente a situaciones cambiantes. El análisis de precios en los mercados financieros parece ser el campo más atractivo para los econofísicos<sup>17</sup>, aunque dentro de sus intereses también destacan las empresas. Desde hace una década se realizan trabajos centrados en la búsqueda de regularidades estadísticas en el comportamiento de diferentes variables en poblaciones o sistemas de empresas. Entre las

---

16. H. E. Stanley, profesor de la Universidad de Boston, fue quién uso por primera vez este término para designar el trabajo de los físicos en el área de las finanzas.

17. R.N. Mantenga y H.E. Stanley : "*An introduction to Econophysics: correlations and complexity in Finance*". Cambridge University Press, 2000.

regularidades más observadas destacan la distribución del tamaño de las empresas y el crecimiento empresarial, Stanley et al (1995), Amaral et al (1997), Gaffeo et al (2003), Okuyama et al (1999), Ramsden y Kiss-Haypal (2000), Stanley et al (2000), Kundsén (2001) Delli Gatti et al (2004).

Los principales resultados que se derivan de los trabajos que se han dedicado a estudiar la distribución del tamaño de las empresas han sido los siguientes:

1. *La distribución del tamaño de las empresas se ajusta a una ley potencial. En términos de la ley de Zipf la frecuencia de aparición de empresas de un determinado tamaño depende inversamente de su rango.*

En primer lugar, siempre ha existido una línea de trabajo –en muchas ocasiones inspirada por Gibrat– que ha considerado que los datos sobre la distribución del tamaño de las empresas se ajustan con bastante rigor a la distribución log-normal; lo afirman trabajos como los de Hart y Prais (1956), para las empresas de Reino Unido y los de Simon y Bonini (1958), Stanley et al (1995), Stanley et al (2000) y Amaral et al (1997) para las empresas estadounidenses. Por otro lado, el trabajo de Axtell(2001) que utiliza una fuente de datos muy potente concluye que la ley potencial<sup>18</sup> ajusta muy bien los datos y que por tanto esta es una buena primera aproximación para la distribución del tamaño de las empresas. Corroboran esta afirmación otros trabajos como los de Gaffeo et al (2003), Okuyama et al (1999), Ramsden y Kiss-Haypal (2000), Stanley et al (2000), Kundsén (2001), Delli Gatti et al (2004)<sup>19</sup>.

---

18. Tanto si nos referimos a ley de Zipf como a la distribución de Pareto.

19.

- Okuyama et al (1999) para las empresas japonesas, base de datos en CD: *Japanese companies the best 85375* publicada en Tokio por Diamon en el año 1998.
- Ramsden y Kiss-Haypal (2000) contrastan el ajuste de diferentes distribuciones a la ley potencial y comprueban que los datos ajustan bien para los siguientes países: Austria, Bélgica, Brasil, Canadá, China, Dinamarca, Francia, Alemania, Gran Bretaña, Hungría, Israel, Italia, Japón, Noruega, Sudáfrica, Suiza, España, Suecia, y Estados Unidos para el año 1994. Las bases de datos son múltiples, consisten en bases en CD como obtenidas de diversas publicaciones. (Continua).
- Stanley et al (2000 p.36) estudia la distribución del tamaño para las empresas estadounidenses, para el periodo 1974-1993, los datos proceden de la base Compustat.

Sabemos también que la distribución del tamaño de las empresas se ajusta a una ley potencial independientemente de la variable que utilicemos para medir el tamaño: cifra de ventas, número de empleados o total de activos entre otros; Axtell (2001, p.1818), Amaral et al (1997), Gaffeo et al (2003).

Como afirman Okuyama et al (1999) y Ramsden y Kiss-Haypál (2000, p.220), aunque la ley de Zipf parece cumplirse de forma generalizada para diversos países, sin embargo, la pendiente o forma de la distribución difiere entre estos. Los investigadores nos advierten que países similares, económica y políticamente pero no socialmente, muestran importantes diferencias en la distribución; sugiriendo que la prosperidad y la riqueza están influidas por elevadas reglas inaccesibles al pensamiento económico estándar.

2. *El ajuste de los datos al comportamiento de ley potencial permanece robusto a lo largo del tiempo.*

Varios trabajos demuestran que el comportamiento potencial permanece a lo largo del tiempo como una característica invariante de la distribución del tamaño de las empresas. Ijiry y Simon (1977) ya advirtieron que el comportamiento asimétrico se mantiene a lo largo del tiempo, que es robusto e insensible ante cambios en la política económica, el entorno, y las olas de fusiones y adquisiciones y que tampoco se ve afectado por las oleadas de entradas de nuevas empresas y de quiebras; sobreviviendo incluso a transiciones demográficas de larga escala dentro de la fuerza de trabajo, y a importantes cambios tecnológicos. Sin embargo, a pesar de la robustez del comportamiento potencial, no podemos afirmar que la distribución del tamaño de la empresa es estable. La posición de los elementos en la distribución y la forma –su pendiente, el exponente de escalamiento– fluctúan a lo largo del tiempo. Mientras que algunos

- 
- Kundsén (2001) para Dinamarca.
  - Gaffeo et al (2003) para un conjunto de empresas de los países del G7 durante el periodo de 1987-2000. Se utiliza como fuente de datos la base *Datastream International* (DI) disponible de forma comercial. La muestra de empresas utilizada es menor que en los otros trabajos.

autores consideran que esta fluctuación es mínima, es decir que la pendiente es estable, Amaral et al (1997), Ramsden y Kiss-Haypál (2000, p.220)<sup>20</sup>; otros sostienen que la pendiente fluctúa, sensiblemente, a lo largo del tiempo; incluso algunos afirman que existe una relación entre el comportamiento del exponente de la distribución y el ciclo económico, Gaffeo et al (2003)<sup>21</sup> y Delli Gatti et al (2004).

3. *La distribución del tamaño de las empresas que pertenecen un mismo sector o rama de actividad también cumple la ley de Zipf*

Okuyama et al (1999, p.128-129) confirman también que las leyes potenciales se mantienen para muchos tipos de actividades, con exponentes ligeramente diferentes. Algunas categorías que presentan comportamiento de ley potencial son: venta al por mayor, transporte terrestre, maquinaria, bienes inmuebles, servicios, alimentación, acero, etc.

Los exponentes de la ley potencial se sitúan entorno a -1 pero se encuentra más comúnmente entre los rangos (-1,2 y -1,7). Los autores trataron de investigar también en que categorías de actividad los datos no se ajustan a la ley potencial, obteniendo que esto ocurría para los sectores de la banca, compañías de seguros y las empresas del sector de la energía; sectores a los que siempre se ha considerado de especial condición. Amaral et al (1997, p. 622) realizan un análisis de las empresas por sectores a partir de su código SIC (Standard Industrial Classification) obteniendo similares resultados. En el capítulo siguiente se aporta evidencia empírica sobre la distribución del tamaño de las empresas en España. Los resultados muestran que en España al igual que para muchos otros países, la distribución se ajusta a una ley potencial.

---

20. Examinan una colección de datos para los años 1984 y 1974, 1978, 1987, 1992 y 1993 para Suiza y Estados Unidos, encuentran que los parámetros prácticamente no cambian.

21. El estudio se realiza para las empresas de los países pertenecientes al G-7 durante el periodo de 1987-2000, los autores consideran que los datos conducen a afirmar que los exponentes son sistemáticamente más bajos en el caso de épocas de recesión que durante las épocas de expansión. Esto significa que como media la producción de las empresas está más distribuida durante las recesiones que durante las expansiones.

En los diferentes fenómenos que hemos relatado en este capítulo y concretamente en la distribución del tamaño de las empresas, los datos proporcionan una imagen nítida –cumplen la regla rango-tamaño– pero, en contraste, el fenómeno es difícil de reproducir a partir de modelos teóricos. La universalidad de las leyes potenciales en la distribución de fenómenos muy diversos caracterizados por una conducta compleja nos obliga a tratar de explicar mecanismos subyacentes que nos dirijan hacia este tipo de distribuciones.

El ajuste de los datos a la ley potencial demuestra que las empresas de mayor tamaño, las más conocidas siguen la misma ley que las empresas de menor tamaño. No deberíamos buscar explicaciones específicas para las empresas de gran tamaño, por el contrario debemos plantearnos una teoría que recoja todos los tipos de tamaños. La teoría debe explicar, a la vez, la existencia de grandes y pequeñas empresas.

## **CAPÍTULO 3**

# ***LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS EN ESPAÑA. EVIDENCIA EMPÍRICA***

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se proporciona evidencia empírica relativa a la distribución del tamaño de las empresas en España y otros países de la Unión Europea.

Para los análisis se utiliza la base de datos SABI (Sistema Anual de Balances Ibéricos) en soporte CD y comercializada por Bureau Van Dike. Esta fuente contiene datos de empresas, establecidas en España y Portugal en base a la información proporcionada en el registro mercantil. SABI presenta dos ventajas fundamentales frente a otras bases de datos. En primer lugar la información que proporciona de cada una de las empresas es bastante amplia, se trata fundamentalmente de información económico-financiera. Recoge datos de cada una de las partidas que forman el Balance y la Cuenta de Pérdidas y Ganancias, además proporciona un informe en el que se analizan estas dos últimas cuentas y el valor de diferentes ratios. En segundo lugar, la cantidad de empresas que aportan información es muy elevada. El número total de empresas que aparecen en la base en el año 2003, en España es, algo más de 600.000.

Aunque, sin lugar a dudas los análisis individuales y comparativos de grupos de empresas son aplicaciones fundamentales de SABI, para este trabajo su utilidad radica en la posibilidad de analizar como se distribuyen diferentes variables a nivel del agregado. Una de las grandes ventajas de esta base de datos es su versatilidad en la forma de extraer la información. Aquí, nos centraremos en analizar como se distribuye la variable tamaño, estudiando el comportamiento

de la distribución para todo el país, para diversas localizaciones seleccionadas, también para ramas concretas de actividad o para ambas cosas a la vez, por ejemplo podemos analizar como se distribuye el tamaño de la empresa para diversos sectores en varias Comunidades Autónomas.

### **3.2 LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS EMPRESAS EN ESPAÑA Y EN OTROS PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA**

A partir de los datos proporcionados por SABI se comprueba que en el estudio de la distribución del tamaño de las empresas los resultados son coincidentes con los análisis realizados para poblaciones de empresas en otros países y regiones económicas.

Los resultados obtenidos avalan el cumplimiento de la ley de Zipf para la distribución del tamaño de las empresas en España, y muestran que dicho comportamiento es robusto en el tiempo.

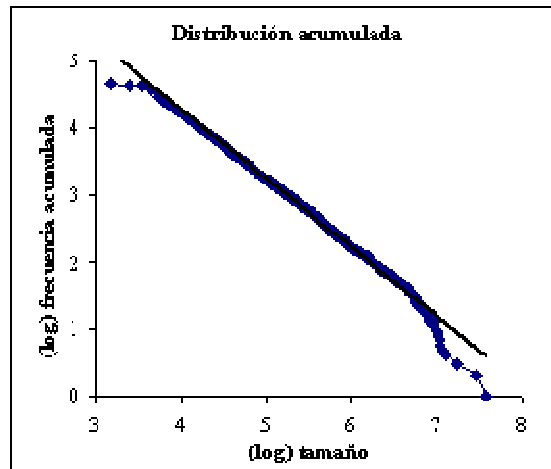
En los trabajos que se ocupan del estudio de distribuciones asimétricas, se utilizan diferentes tipos de representaciones para explicar el fenómeno. Recordamos cuales son esas aproximaciones:

1. Pareto analiza la asimetría a partir de la distribución de frecuencias acumulada. En términos de Pareto analizamos la frecuencia de aparición de empresas por encima de un determinado tamaño.
2. Desde la física estadística, estos fenómenos que estamos describiendo se conocen como leyes potenciales. En este caso se suele relacionar el tamaño de un evento con su frecuencia de aparición. Como en este tipo de distribuciones no existe un tamaño característico del evento, los fenómenos que se ajustan a leyes potenciales reciben el nombre de libres de escala.
3. La ley de Zipf que relaciona la frecuencia de aparición de un suceso –en nuestro caso el tamaño de la empresa- con su rango.
4. La ley rango-tamaño, que relaciona el tamaño de un evento con su rango.

En todos los casos si representamos en una escala doble logarítmica las variables relacionadas los datos se ajustan con bastante exactitud a una línea

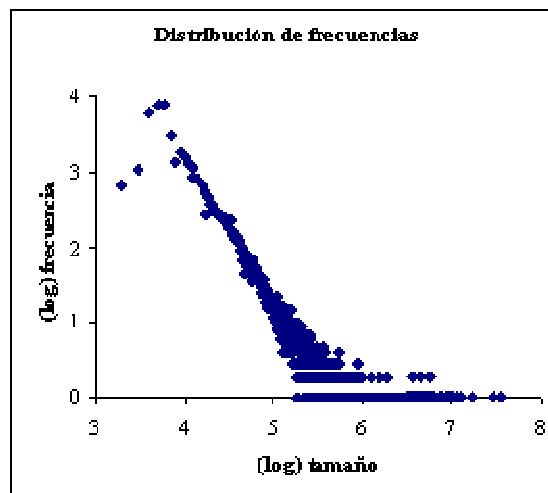
recta. Las figuras 3.1, 3.2, 3.3, y 3.4 representan los cuatro casos descritos anteriormente.

1.



*Figura 3.1. Distribución de frecuencias acumuladas del tamaño de las empresas en España. Distribución de Pareto, año 2002.*

2.



*Figura 3.2. Distribución de frecuencias del tamaño de las empresas en España, año 2002.*

3.



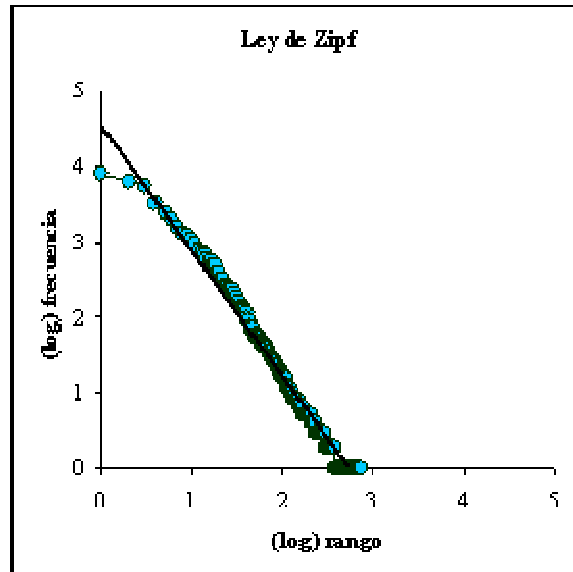


Figura 3.3. Ley de Zipf en la distribución del tamaño de las empresas en España, año 2002.

4.

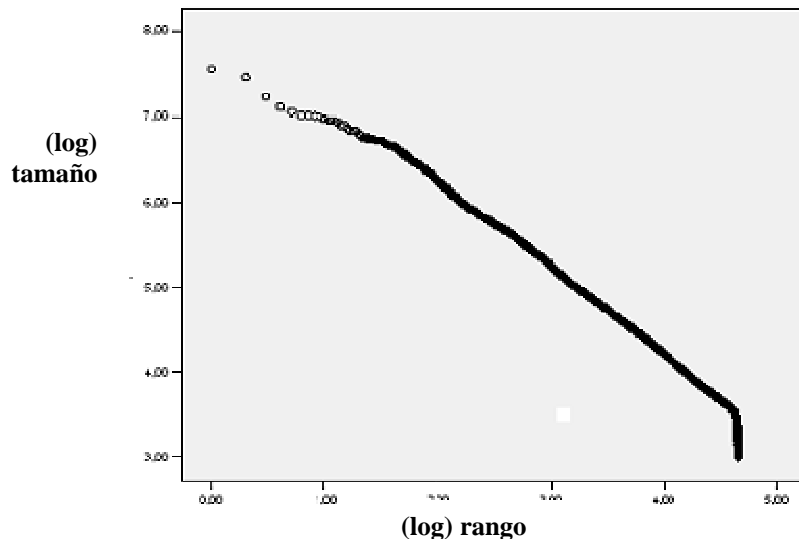


Figura 3.4. La Regla Rango-Tamaño en la distribución del tamaño de las empresas en España, año 2002.

Para la realización de las cuatro figuras anteriores Se ha utilizado la misma población de datos: todas aquellas empresas que aportaban datos en el año 2002, con un tamaño –ingresos de explotación– a partir de 1 millón de euros, el número de empresas es de 45.467.

La figura 3.1 muestra que los datos sobre frecuencia acumulada y tamaño, ambos en términos logarítmicos, se ajustan muy bien a la recta de regresión:  $y = -1,0293x + 8,398$ , siendo  $x$  el logaritmo del tamaño e  $y$  el de la frecuencia acumulada. El coeficiente de regresión  $R^2$  alcanza un valor de 0,99. Estos datos avalan la hipótesis de que la distribución del tamaño de las empresas se ajusta a una distribución de Pareto, con un valor de la pendiente prácticamente igual a 1.

En la figura 3.2. se muestra la distribución de frecuencias del tamaño, en este caso, el eje de la  $y$  representa la frecuencia de aparición de cada tamaño, y en el eje de las  $x$  el tamaño de la empresa. En la figura podemos comprobar como la distribución del tamaño de las empresas en España se ajusta a una ley potencial. Las empresas de gran tamaño son poco frecuentes junto a una gran aparición de empresas de pequeño tamaño. En este caso, las empresas han sido agrupadas en intervalos de 1 millón de euros, así el tamaño más pequeño es de las empresas con una facturación de 1.000.001 a 2.000.000 euros. Se calcula la frecuencia de cada intervalo y se relaciona con su tamaño.

La figura 3.3. es la típica representación Zipf, donde se relaciona la frecuencia de aparición de un suceso (en nuestro caso el tamaño) con su rango. Al igual que para la figura 3.2. se obtienen las frecuencias de cada intervalo, se ordenan de mayor a menor  $y$ , en este caso, se les asigna a cada una de ellas un rango; de manera que el tamaño más frecuente tendrá el rango 1, el segundo tamaño más frecuente el rango 2, y así sucesivamente. Cuando relacionamos el logaritmo del rango ( $x$ ) respecto al logaritmo de la frecuencia de aparición ( $y$ ) observamos que los datos se ajustan con mucha exactitud a la recta de regresión:

$$y = -1,6575x + 4,529$$

con un coeficiente de ajuste  $R^2$  que alcanza un valor igual a 0,97.

Por último, la figura 3.4. permite observar que la regla rango-tamaño, se cumple en el caso de la distribución del tamaño de las empresas en España, los datos se ajustan con mucha exactitud a la recta de regresión lineal y al igual que predice Zipf (1949) la pendiente de dicha recta está muy próxima a 1. En este caso el ajuste de los datos nos indica que el tamaño ( $y$ ) es inversamente proporcional al rango ( $x$ ). La recta de regresión que ajusta los datos es:

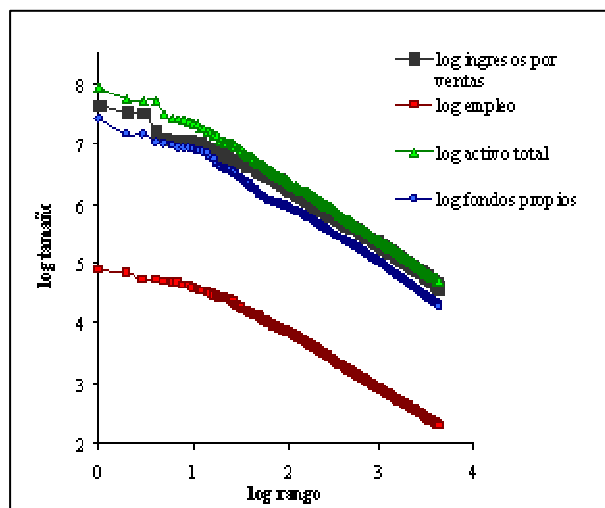
$$y = -1,047x + 8,3917, \text{ con } R^2 = 1.$$

En el trabajo original de Zipf, concretamente en la distribución de frecuencia de las palabras y la regla rango-tamaño aplicada a las ciudades, la pendiente de la recta de regresión es igual a 1. Muchos trabajos posteriores han obtenido que los datos se ajustan a un comportamiento lineal entre el rango y el tamaño pero la pendiente difiere, frecuentemente, situándose entre 1 y 2. En los primeros trabajos, el valor del exponente de la distribución potencial, más concretamente su divergencia del valor original dado por Zipf parecía ser una cuestión relevante, pero hoy en día parece que este aspecto ha perdido peso para los investigadores. Se considera que lo relevante es la existencia de un comportamiento potencial entre la frecuencia y el tamaño o rango, aunque éste difiera del valor inicial que Zipf le otorgó.

En nuestro caso, además de cumplirse el ajuste de los datos a la distribución de Pareto, a la regla rango-tamaño y a la ley de Zipf, en las dos primeras distribuciones, el exponente es prácticamente igual a 1, es decir los datos se ajusta al comportamiento original descrito por Zipf. No ocurre lo mismo en el tercer caso, cuando relacionamos la frecuencia de aparición de un tamaño con su rango, aquí el exponente difiere de 1. Aunque, como se observó en la realización de los análisis empíricos, el tamaño de los intervalos que establezcamos para determinar la frecuencia de aparición condicionan el valor del exponente considerado. En todo caso, sabemos que las cuatro gráficas anteriores son formas alternativas de representar un mismo fenómeno. En este trabajo se utiliza, más

frecuentemente, la relación entre el rango y el tamaño - figura 3.4.- por su mayor facilidad de cálculo frente a los otros tipos de representación.

Los estudios relativos al tamaño de las empresas siempre han topado con la dificultad adicional de la inexistencia de una variable clara para medir el tamaño. Las variables más utilizadas en los trabajos empíricos realizados han sido los ingresos, la cifra de ventas o el nivel de empleo, aunque también se han utilizado los fondos propios o el activo total. La diversidad de variables utilizadas ha limitado la posibilidad de comparar los resultados obtenidos y ha añadido dificultad a la cuestión. En la figura 3.5. se puede observar que la regla rango-tamaño se cumple, en España, cuando utilizamos diferentes variables para aproximar el tamaño. En este caso ha sido, el ingreso por ventas, el empleo, los fondos propios y el activo total. Como se puede comprobar, en todos ellos, el ajuste de los datos es muy elevado con un  $R^2 > 0,99$  y la pendiente muy similar y muy próxima a 1, excepto cuando el tamaño se aproxima por el nivel de empleo. Para la elaboración de la gráfica se han utilizado las 4.300 empresas de mayor tamaño.



**Figura 3.5. Comparación de la regla rango-tamaño cuando aproximamos el tamaño a partir de diferentes variables. Año 2001.**

	<b>Pendiente</b>	<b>Constante</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Ingresos de explotación</b>	0,998	8,262	0,995
<b>Empleo</b>	0,929	5,689	0,996
<b>Fondos Propios</b>	1,028	8,055	0,995
<b>Activo total</b>	1,036	8,461	0,999

**Cuadro 3.1. Variables de ajuste a la recta de regresión  $y = -\alpha x + b$ , siendo  $x$  e y el logaritmo del rango y el tamaño respectivamente. España 2001**

Como veremos a lo largo del trabajo, las distribuciones de Zipf, son distribuciones *metaestables*, el sistema parte de una serie de tamaños y a la larga se estabiliza en este tipo de distribuciones asimétricas. A lo largo del tiempo las empresas no ocupan un mismo lugar en la distribución: nuevas empresas entran en el mercado, otras desaparecen y todas ellas, van moviéndose hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la distribución, pero la regla rango-tamaño se sigue cumpliendo.

En la figura 3.6. el tamaño se ha aproximado por los ingresos de explotación para el periodo 1998-2002, se han considerado todas las empresas con unos ingresos a partir de 1 millón de euros. Como podemos observar la relación entre el rango y el tamaño permanece estable durante el periodo considerado. El ajuste de los datos es muy elevado en todos los casos y la pendiente permanece prácticamente invariable. Aunque el periodo de tiempo es demasiado limitado para afirmar rotundamente algo sobre la estabilidad de la distribución, nos apoyamos en los trabajos de Zipf, Gibrat y Pareto que ya manifestaron la robustez de la ley desde mucho tiempo atrás.

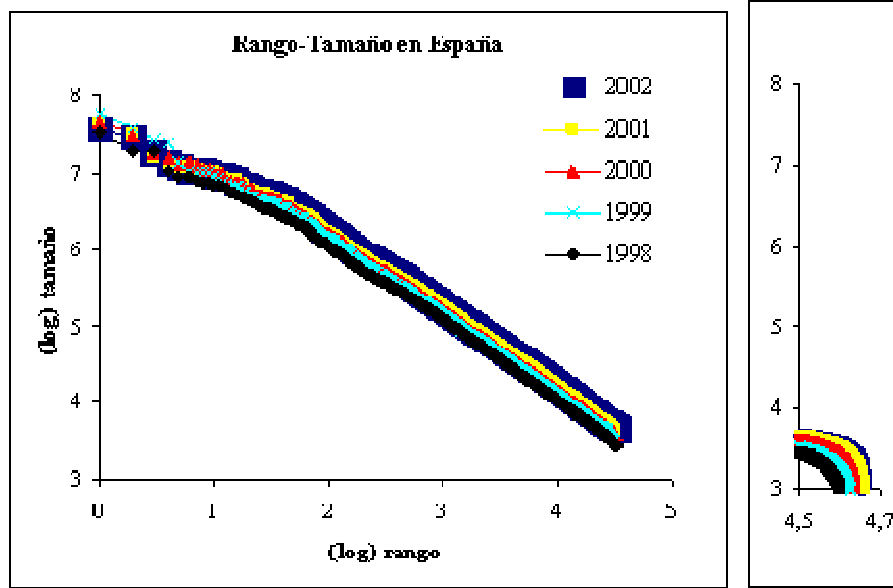


Figura 3.6. La Regla Rango-Tamaño para la distribución del tamaño de las empresas a lo largo del periodo 1998-2002.

	Pendiente $\alpha$	Constante $b$	$R^2$	Nº de empresas
2002	1,047	8,3917	1,00	45.467
2001	1,048	8,3799	1,00	45.862
2000	1,051	8,3457	1,00	43.945
1999	1,045	8,2595	1,00	42.205
1998	1,053	8,2346	1,00	40.183
Varianza	8,533E-06			

Recta de regresión:  $y = -\alpha x + b$ , siendo  $y$  el logaritmo del tamaño y  $x$  el logaritmo del rango.

Cuadro 3.2. Regla Rango-Tamaño en España para el periodo 1998-2002, valores de la recta de regresión y coeficiente de ajuste.

Cómo vimos en el capítulo 2 otros investigadores han demostrado que la distribución del tamaño de las empresas en otros países también se ajusta a una ley potencial. En este trabajo también se demuestra que la regla rango-tamaño se cumple para diversos países europeos, apoyando la idea de que el comportamiento de ley potencial es universal en la distribución del tamaño de las empresas. Utilizamos para ello la base de datos AMADEUS también comercializada por el Bureau van Dike y con un formato muy similar al de SABI.

AMADEUS contiene el mismo tipo de información que SABI pero para muchos países europeos. Sin embargo, la profundidad de la base, entendida como el número de empresas que proporcionan información, para cada país, es menor. En la figura 3.7. aparece representada la regla rango-tamaño para varios países europeos. El cuadro 3.3. informa sobre la pendiente de la recta de regresión y la bondad del ajuste. En todos los casos el coeficiente  $R^2$  es muy elevado, e incluso igual a 1 para varios países. La población está formada por todas las empresas de la base con unos ingresos de explotación  $\geq 10$  millones de dólares estadounidenses. También se representa la relación entre el rango y la frecuencia –figura 3.8.- en todos los casos podemos afirmar que se cumple la ley de Zipf.

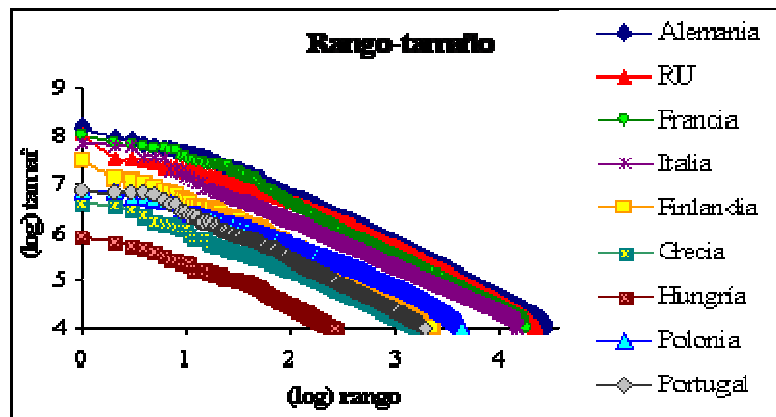
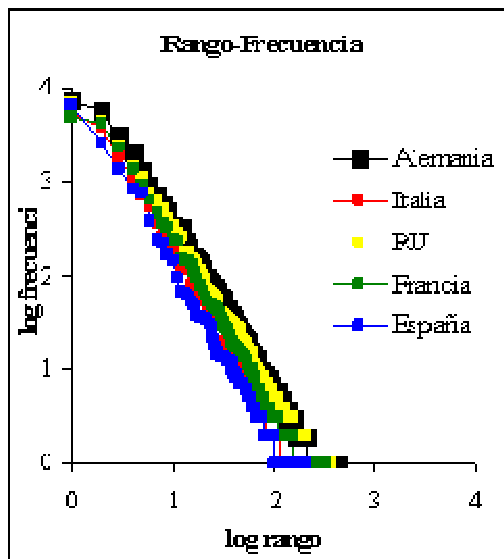


Figura 3.7. La regla rango-tamaño en países de la Unión Europea. Año 2002.

	Pendiente A	R <sup>2</sup>	Nº empresas
<b>Alemania</b>	1,12	1,00	26.763
<b>R.U.</b>	1,16	0,99	22.500
<b>Francia</b>	1,07	1,00	18.334
<b>Italia</b>	0,96	1,00	14.991
<b>Finlandia</b>	1,17	0,99	2.393
<b>Grecia</b>	0,93	0,99	1.716
<b>Polonia</b>	1,02	0,97	4.405
<b>Portugal</b>	1,06	1,00	1.964

$y = -\alpha x + b$  siendo  $x$  e  $y$  el logaritmo del rango y del tamaño respectivamente.

**Cuadro 3.3.** *La regla rango-tamaño en países de la Unión Europea, año 2002. Valores de la pendiente de la recta de regresión lineal y del coeficiente R<sup>2</sup>*



	Pendiente	R <sup>2</sup>	Nº empresas
<b>Alemania</b>	-1,663	0,97	26.763
<b>Francia</b>	-1,653	0,97	18.334
<b>RU</b>	-1,678	0,98	22.500
<b>Italia</b>	-1,65	0,97	14.991
<b>España</b>	-1,739	0,97	14.013

**Figura 3.8.** *La Ley de Zipf, relación entre la frecuencia del tamaño y su rango en varios países de la Unión Europea.*



### 3.3. FRACTALIDAD E INVARIANZA DE ESCALA EN EL ESPACIO

Una vez demostrado el comportamiento potencial en la distribución del tamaño de las empresas en diferentes países, parece lógico preguntarse si este comportamiento se mantiene para espacios o límites geográficos más reducidos, como por ejemplo, las Comunidades Autónomas, provincias y municipios. Como vimos en el capítulo 2, Mandelbrot (1987), descubrió que la distribución de las fluctuaciones seguía ajustándose a una ley potencial cuando consideramos fluctuaciones relativas a diferentes escalas de tiempo. La distribución de frecuencias de las fluctuaciones en los precios era similar cuando se consideraban cambios de un día, de una semana o de un mes. Esta característica, presente en las distribuciones de ley potencial, nos dice que la forma de la distribución, el *macrocomportamiento* que observamos, se mantiene si medimos el evento en diferentes escalas, característica conocida con el nombre de *invarianza de escala*.

Aunque el término de conjuntos autosemejantes y fractalidad se aplica a objetos en el espacio, también suele aplicarse a comportamientos estadísticos. Las investigaciones realizadas revelan que la distribución del tamaño de las empresas es fractal, el comportamiento de las partes es semejante al todo. En este trabajo, la fractalidad ha sido abordada desde dos vertientes: en primer lugar se ha analizado la distribución del tamaño de las empresas en distintas localizaciones, unas contenidas en otras; y en segundo lugar, se ha analizado la distribución del tamaño para distintos grupos de actividades que componen la producción total.

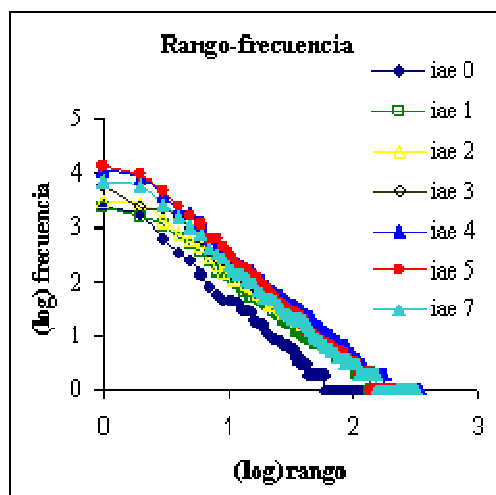
En la figura 3.10. (página 71), se representa la ley de Zipf para España y tres Comunidades Autónomas: El País Vasco, Cataluña y la Comunidad Valenciana; también se ha obtenido la representación para diversas provincias de cada una de las Comunidades. Como en todos los casos anteriores, la bondad del ajuste es elevada, los datos cumplen la ley. En este caso, el tamaño se ha aproximado por el nivel de empleo, se consideran todas las empresas que aportan información en la base de datos, con un nivel de empleo  $\geq 40$ , y se las agrupa en intervalos de diez en diez, de manera que la clase de tamaño más pequeña

corresponde al intervalo de 40 a 49 trabajadores, ambos incluidos, la segunda clase será de 50 a 59, y así sucesivamente. Los datos corresponden al año 2002.

Aunque se observa que la ley de Zipf se cumple en todos los territorios considerados, la pendiente de la recta es diferente de unos lugares a otros. El diferente valor nos indica que la estructura del sistema productivo difiere en las diferentes regiones consideradas. Cuanto mayor sea la pendiente más aumentará la frecuencia de cada tamaño a medida que vayamos considerando rangos más pequeños. Aunque no sin excepciones, podemos considerar que los tamaños más pequeños corresponden a las frecuencias más elevadas, de manera que una mayor pendiente nos indicará que aumenta más la frecuencia de empresas a medida que se reduce el tamaño (el rango). Si la pendiente es más inclinada las empresas de menor tamaño son relativamente más frecuentes. Como puede apreciarse en la tabla incluida en la figura 3.10, de las tres Comunidades Autónomas representadas, la Comunidad Valenciana es la que presenta mayor pendiente, es decir, tiene una mayor presencia relativa de empresas de pequeño tamaño. Por el contrario, el País Vasco y especialmente el caso de Álava es el que presenta una pendiente más pequeña, consistente con la idea de un sector empresarial formado por empresas de mayor dimensión, o menor presencia de empresas pequeñas. Los análisis realizados también revelan algo inquietante, la pendiente de la función en el caso de las Comunidades Autónomas es, en todos los casos, mayor a la de cada una de sus provincias, en ningún caso se trata de una media.

Otra evidencia empírica parece señalar que la distribución del tamaño de las empresas se ajusta también a la regla rango-tamaño o ley de Zipf para diferentes ramas de actividad. SABI permite seleccionar la información a partir de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas, CNAE desde 1 a 4 dígitos. En un primer momento, se planteó la posibilidad de estudiar por sectores el cumplimiento de la ley y observar que características diferenciales podíamos encontrar, pero muchas empresas realizan diferentes actividades y los datos sobre producción o empleo, proporcionados por estas, comparten cifras que corresponden a ventas o actividad conjunta de los distintos sectores en los que la empresa trabaja. Aunque demostrásemos que se cumple Zipf, o se conociesen los

casos en que no se cumple, no podríamos dar una explicación satisfactoria de estos resultados. Por otro lado ¿qué nivel de clasificación deberíamos utilizar?, en el caso de que utilizásemos más de un dígito, la tarea a desarrollar sería muy costosa. No obstante, pese a estas limitaciones, se ha decidido explorar la fractalidad a partir de la clasificación realizada en el I.A.E., ver figura 3.9.



**Figura 3.9.** La ley de Zipf para diferentes sectores de la economía en España. Año 2002

	Pendiente	Constante	R <sup>2</sup>	Nº de empresas
<b>iae 0</b>	-1,768	3,414	0,96	7.907
<b>iae 1</b>	-1,520	3,517	0,97	3.039
<b>iae 2</b>	-1,543	3,633	0,97	11.977
<b>iae 3</b>	-1,630	3,840	0,97	22.082
<b>iae 4</b>	-1,725	4,136	0,97	34.169
<b>iae 5</b>	-1,787	4,125	0,96	37.251
<b>iae 7</b>	-1,611	3,781	0,96	22.635

**Cuadro 3.4.** Ley de Zipf para varias categorías de actividad en la economía española. Ajuste de los datos a la recta de regresión entre el logaritmo de la frecuencia y el logaritmo del tamaño y valores de R<sup>2</sup>.

	<b>pendiente</b>	<b>C</b>	<b>R</b>	<b>N</b>
<b>iae 0</b>	-1,039	6,739	1,00	7.907
<b>iae 1</b>	-1,280	8,095	1,00	3.039
<b>iae 2</b>	-1,402	8,553	0,98	11.977
<b>iae 3</b>	-1,23	8,132	1,00	22.082
<b>iae 4</b>	-1,167	8,116	0,99	34.169
<b>iae 5</b>	1,039	7,565	0,99	37.251
<b>iae 7</b>	-1,206	8,051	0,99	22.635

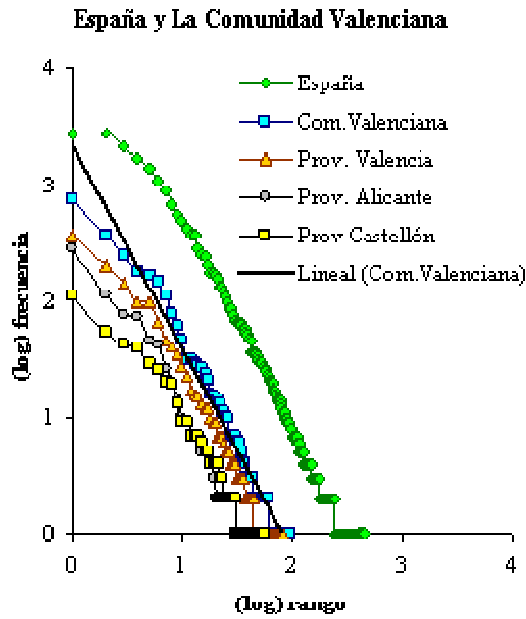
***Cuadro 3.5. Ley Rango-Tamaño para diferentes categorías de actividad.  
Valores de la recta de regresión. Año 2002***

Un paso más ha sido tratar de averiguar hasta donde se cumple la ley, se ha analizado como se comporta la distribución del tamaño de las empresas para un determinado sector. Se ha elegido el sector de la construcción, concretamente todas las empresas que aparecen en la categoría 45 de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas y presentan unos ingresos de explotación  $\geq 500$  mil euros, en el año 2002. Comprobamos si la ley se cumple para este sector en distintos espacios geográficos, en muchos casos unos contenidos en otros. El cuadro 3.6. muestra los resultados obtenidos: en todos los casos se cumple la ley de Zipf, la interpretación de la pendiente es algo que aún está por determinar.

*Log tamaño = - $\alpha$  log rango + Constante*

<b>CNAE 45</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Nº empresas</b>
<b>España</b>	-1,0604	0,99	10.061
<b>Cataluña</b>	-0,868	0,99	6418
<b>Madrid</b>	-1,242	0,99	4.969
<b>Andalucía</b>	-0,829	0,98	4.356
<b>Galicia</b>	-0,8742	0,99	1.753
<b>Aragón</b>	-0,8257	0,98	1.022
<b>País Vasco</b>	-0,9757	0,98	1.693
<b>Castilla-León</b>	-0,8666	0,98	1.651
<b>Castilla-La Mancha</b>	-0,7465	0,98	1.318
<b>Canarias</b>	-0,9076	0,97	1.016
<b>Murcia</b>	-0,7893	0,99	986
<b>Baleares</b>	-0,7816	0,98	924
<b>Asturias</b>	-0,9712	0,99	772
<b>Extremadura</b>	-0,8176	0,99	489
<b>Cantabria</b>	-0,9238	0,98	360
<b>La Rioja</b>	-0,8541	0,97	243
<b>Comunidad Valenciana</b>	-0,9159	0,99	2.569
<i>Provincia de Valencia</i>	-1,0017	0,99	1.222
<i>Ciudad de Valencia</i>	-1,2788	0,98	379
<i>Provincia de Alicante</i>	-0,8515	0,98	1.039
<i>Ciudad de Alicante</i>	0,9933	0,99	159
<i>Provincia de Castellón</i>	-0,8063	0,98	492
<i>Castellón de la Plana</i>	-1,0332	0,98	107

**Cuadro 3.6. Sector Construcción. Ley de Zipf. Valores de la pendiente de la recta de regresión**



	Pendiente $\alpha$	R <sup>2</sup>	Nº de empresas
España	-1,676	0,97	20.329
<b>Comunidad Valenciana</b>	-1,739	0,98	2.627
Prov. Valencia	-1,622	0,97	1.378
Prov. Alicante	-1,706	0,97	792
Prov. Castellón	-1,412	0,96	466
<b>País Vasco</b>	-1,400	0,97	1.560
Vizcaya	-1,301	0,97	774
Guipuzcoa	-1,292	0,96	499
Alava	-1,175	0,95	263
<b>Cataluña</b>	-1,613	0,97	5.516
Prov. Barcelona	-1,569	0,97	4.531
Prov. Girona	-1,491	0,96	446
Prov. Tarragona	-1,340	0,97	316
Prov. Lleida	-1,404	0,97	211

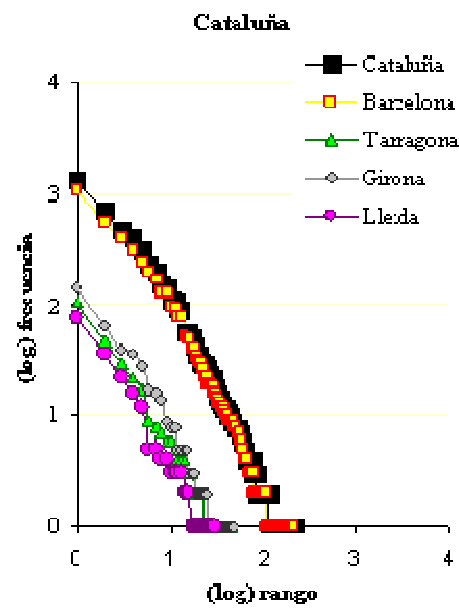
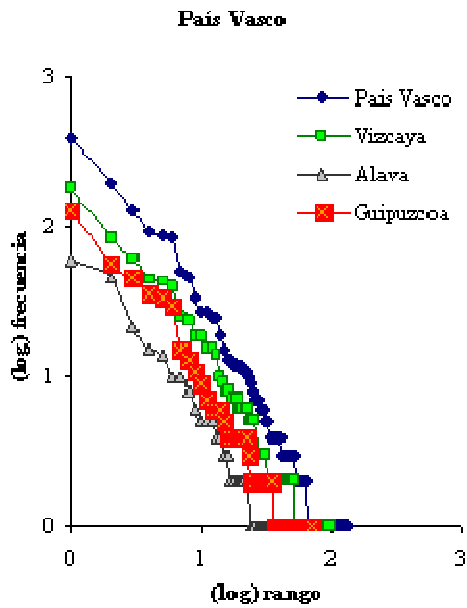


Figura 3.10. Invarianza de escala en el espacio.



## **PARTE II.**

### **COMPLEJIDAD Y AUTOORGANIZACIÓN. FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS**

---

«Los supuestos básicos de nuestras tradiciones y las persistentes implicaciones del lenguaje que usamos, casi nos fuerzan a abordar todo lo que estudiamos como si estuviera compuesto de partes o factores separados, discretos, que debemos tratar de aislar e identificar como causas potentes. De ahí derivamos nuestra preocupación por el estudio de la relación entre dos variables. Somos hoy testigos de la búsqueda de nuevos enfoques, de conceptos nuevos y más amplios y de métodos capaces de vérselas con grandes conjuntos de organismos y personalidades.»

Von Bertalanffy (1993, 1968, p. 15)





## **CAPÍTULO 4**

### **TEORIAS DE LA COMPLEJIDAD**

«La complejidad es la ciencia de lo “emergente”. En otras palabras, trata de cómo grandes conjuntos en interacción –integrados ya sea por moléculas de agua, neuronas, bipolos magnéticos o consumidores– manifiestan comportamientos colectivos muy distintos de los que cabría haber esperado de la simple agregación de los comportamientos de los entes individuales.».

Krugman (1997, p.8): “*La organización espontánea de la economía*”.

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Esta investigación trata de avanzar en la comprensión de una regularidad estadística observable a nivel del conjunto de empresas existentes en un determinado territorio, la ley de Zipf. La regularidad ha sido estudiada en diversos campos que hoy se engloban dentro de lo que se conocen como ciencias de la complejidad. Analizar la distribución del tamaño de las empresas bajo este enfoque pasa por considerar que el conjunto de empresas que ejercen actividad en un territorio forman un sistema complejo autoorganizado. En este capítulo se tratarán las teorías e ideas que fundamentan esta afirmación.

La Complejidad recoge toda una serie de teorías que surgen a partir de la segunda mitad del siglo XX, son teorías que proporcionan un marco adecuado para el estudio del comportamiento de grandes conjuntos de elementos en interacción, como es el caso de las empresas que participan en un mercado y los

sistemas formados por éstas. Una parte de ésta nueva ciencia, como algunos la consideran, se centra en el estudio de los sistemas complejos caracterizados por presentar conducta compleja. Los agentes que forman parte de estos sistemas se mueven entre el orden y el azar e interaccionan entre sí generando una dinámica no lineal. Cuando tratamos con estos sistemas no podemos explicar su comportamiento a partir del comportamiento de un agente individual. Este enfoque nos explica que el todo no puede ser explicado por las partes.

Estas teorías surgen cuando una serie de científicos, pertenecientes a disciplinas diferentes, que utilizaban métodos analíticos para resolver sistemas simples, comienzan a emplear el término “complejidad”, tomado del lenguaje común, para describir fenómenos cuyo comportamiento no era predecible. Las teorías van surgiendo con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial, aunque las raíces de los fundamentos matemáticos se remontan más tiempo atrás. Cuando se habla de teorías de la complejidad (o, a veces del caos) generalmente se está agrupando bajo esta denominación a un conjunto de hallazgos realizados dentro de varias áreas, entre las que destacan la física, la química, la biología, la matemática, la geometría, la meteorología y la cibernética. Todas ellas revelan un conjunto de rasgos o fenómenos no contemplados en las teorías existentes o anteriores. Estos estudios pueden ser agrupados en lo que se ha denominado análisis de dinámicas no lineales y de autoorganización. Se centran en el estudio de sistemas y procesos caracterizados por dinámicas no lineales sin despreciar ningún campo de aplicación, estudian fenómenos que entran tanto en el campo de las ciencias naturales como sociales. Los principios de la complejidad se resisten a los moldes estrictamente disciplinares del conocimiento científico siendo claramente transdisciplinares.

La ciencia se enfrenta frecuentemente con fenómenos (complejos) en los que gran parte de las situaciones son desconocidas. Aunque si se tiene conocimiento de los agentes que interactúan no se conocen todas aquellas variables de las que depende, o en el caso de ser conocidas, se producen múltiples interacciones que hacen imposible la predicción. La incapacidad de

comprender el comportamiento de estos sistemas por los métodos tradicionales explica la aparición de la complejidad como ciencia.

## **4.2 DEL PARADIGMA MECANICISTA AL PARADIGMA DE LA COMPLEJIDAD**

Podemos afirmar que el paradigma de la complejidad recoge y unifica una serie de descubrimientos y teorías que provienen de campos como la cibernética, la teoría de sistemas, la teoría de la información, la teoría del caos y las teorías de la autoorganización. Suele hablarse de «paradigma de la complejidad» para referirnos a lo que de hecho es un magma de teorías procedentes de diversas disciplinas que convergen en diferentes vías en torno a un nuevo concepto de orden. Para García Velarde et al (1991, pp.12-14) este paradigma emergente se caracteriza por apuntalar frente al mecanicismo reduccionista la imagen de un universo intrínsecamente creativo y por tener altas pretensiones de interdisciplinariedad. García Olivares (1988, pp.244) señala que la teoría de la complejidad aspira a tender un puente «entre todas las ciencias cuyo objeto sean los sistemas complejos, mediante un lenguaje científico común» proporcionando una serie de «propiedades o comportamientos universales aplicables particularmente a las distintas disciplinas» García Velarde et al (1991, p.16).

En la segunda mitad del siglo XX y, más concretamente, desde los años 50 hasta la década de los 70, la Teoría General de Sistemas proporcionó las herramientas conceptuales y metodológicas apropiadas para generar un conocimiento de la realidad como un todo organizado, en funcionamiento, compuesto de múltiples dimensiones y elementos interrelacionados. Sin embargo, esta nueva forma de interpretar la Realidad, llamada *Sistémica*, no desbancará al pensamiento analítico de la ciencia clásica. Será necesario llegar al último tercio del siglo XX para que la aparición de nuevos hallazgos –englobados bajo el rótulo de Paradigma de la Complejidad– supongan un ataque directo a los principios del paradigma mecanicista.

La visión de la ciencia clásica que concebía el universo como un conjunto de procesos reversibles sujetos a leyes deterministas ha tenido que ser finalmente descartada tras el ataque que han sufrido sus dos presupuestos básicos: «el conocimiento preciso de las condiciones iniciales y la existencia de leyes universales o absolutas con las que operar», Boya *et al.* (1990, p.16). El potencial predictivo de la ciencia moderna se basaba en el supuesto de que la dinámica del universo respondía a leyes deterministas, que el comportamiento lineal era el habitual, y, por lo tanto, que cada efecto era proporcional a su causa. Esta visión del mundo es heredera de los modelos mecanicistas que se desarrollaron con el estudio del comportamiento de los planetas. Las contribuciones de Copérnico, Galileo y Kepler fortalecieron la idea de un sistema solar predecible que hasta entonces había sido considerado algo mágico o de orden divino. Tiempo después Newton sin duda fue quién más fortaleció el modelo de un universo como una gran mecanismo al aportar las leyes de la gravitación universal. Estas ideas, dada su posibilidad de reducir la incertidumbre al sintetizar el comportamiento de la realidad a principios lineales y causales, arraigaron en la ciencia, tecnología, sociedad, economía y cultura. Sin embargo, entrado el siglo XX, esta concepción del mundo sufrirá un descalabro espectacular como consecuencia de los resultados arrojados por diversos estudios. En palabras de Gell-Mann (2003, p.42): «De acuerdo con la física decimonónica, el conocimiento exacto de las leyes del movimiento y de la configuración del universo en un momento dado permitiría, en principio, la predicción de la historia completa de éste. Ahora sabemos que esto es absolutamente falso».

En 1890 Poincaré publica un artículo en el que afirma que el sistema formado por tres cuerpos Sol-Tierra-Luna (en interacción) no puede ser explicado por la mecánica clásica tradicional. Demostró que por simple que parezca el comportamiento de tres cuerpos representaba un comportamiento complejo a través de una dinámica irregular. Calcular el comportamiento de dos cuerpos por ejemplo Sol-Tierra a través de los principios newtonianos era exacto y totalmente predecible, pero al agregar un tercer cuerpo (la Luna) las ecuaciones de Newton se vuelven insolubles. Bastantes años después, en 1969, el

meteorólogo estadounidense E. Lorenz publica un trabajo sobre la convección atmosférica donde, sin pretenderlo, demostraba que un fenómeno tan natural como la dinámica de convección atmosférica presenta una extraordinaria *sensibilidad a las condiciones iniciales*<sup>22</sup>. El argumento de Lorenz resultaba contundente para explicar la molesta impredecibilidad de los fenómenos atmosféricos que se resistían a ser explicados por la ciencia moderna. Lorenz mostró que nunca es posible la medición exacta de las condiciones iniciales de un sistema, la ciencia opera con modelos, con aproximaciones ideales a la realidad; además hoy ya sabemos que en sistemas con *sensibilidad a las condiciones iniciales* el más mínimo error en la medición de éstas se amplifica y desbarata toda posibilidad de predicción, Ruelle (1993: p.88). A menos que «... las condiciones iniciales puedan especificarse con infinita precisión, los sistemas se tornan rápidamente impredecibles», Hayles (1993). En esta línea Prigogine (1988, p.22) afirmará que un nuevo paradigma mostrará cómo el determinismo y la reversibilidad –pilares del mecanicismo– son aspectos que corresponden más a las condiciones artificiales del laboratorio y a nuestra forma de describir el mundo racionalmente que a la naturaleza en sí.

Entre los hallazgos de los que es deudora la actual teoría de la complejidad se encuentran: las investigaciones de Lorenz sobre no-linealidad, la cibernética con la idea de retroalimentación y, con ambas, la de una causalidad no lineal donde los efectos no son proporcionales a las causas; los objetos fractales de Mandelbrot y los atractores extraños; los desarrollos de la teoría de sistemas, de la termodinámica y de las teorías de la información con la noción de autoorganización aportada por la teoría de los autómatas autoorganizados de Von Neumann; el principio de generación de orden a través del ruido de Von Foerster y la teoría de las estructuras disipativas de Prigogine. En general podemos

---

22. Es un fenómeno característico de los *sistemas caóticos*, en virtud del cual, la evolución de sistemas que parten de condiciones iniciales muy próximas, con diferencias apenas perceptibles, divergen a una tasa constante. De igual modo, pequeños errores en la medición de las condiciones iniciales de un sistema conducen inevitablemente a errores amplificados en la predicción esperada, Ruelle (1993, pp.45-55).

afirmar que se aplican las herramientas de la dinámica no lineal, opuesta a la idea de lo *simple-lineal-mecanicista*, para explicar estos sistemas que más tarde serán denominados sistemas complejos adaptativos.

El enfoque de la complejidad postula la necesidad de organizar el conocimiento científico desde la transdisciplinariedad. Critica la vocación analítica de la ciencia positivista que genera un saber especializado, reduccionista y fragmentado. Si bien es cierto que los esfuerzos interdisciplinares nos ayudan a prevenir los excesos de especialización y de compartimentación del saber, para este enfoque resultan insuficientes para poder explicar la complejidad de los fenómenos tanto físicos, biológicos o sociales. Es decir, la interdisciplinariedad no resulta una estrategia válida para dar cuenta del entrelazamiento de las múltiples dimensiones sobre las que se organiza la realidad como un Todo, se necesita un enfoque transdisciplinar.

En las últimas décadas, en el campo de las ciencias sociales comienzan a transferirse toda una constelación de términos, principios y leyes explicativas que se han desarrollado y utilizado en los nuevos modelos científicos derivados de las nuevas teorías. Las analogías, metáforas y préstamos teóricos que reciben hoy en día las ciencias sociales de las ciencias naturales no constituyen una excepción si contemplamos la historia evolutiva de estas ciencias, ni tampoco responde a una cuestión de “modas” intelectuales. Como señala Mayntz (2002, p.65), las disciplinas científicas por más que «pretendan configurarse como unidades grupales limpiamente delimitadas, difícilmente logran formar sistemas cerrados desde el punto de vista cognitivo. Al contrario, la historia evolutiva de la ciencia está plagada de casos de cruces trasfronterizos y de enriquecimiento recíproco».

En este momento la Teoría del Caos y el Paradigma de la Complejidad constituyen los actuales modelos científicos trasdisciplinares de los que se nutren teóricos de diversas áreas científicas. La visión sistémica –relacional, no lineal– unida a los nuevos desarrollos científicos que explican la emergencia de estructuras nuevas o más complejas (orden) a partir de lo imprevisible o

aparentemente aleatorio (caos), permiten explicar y comprender los fenómenos, o sistemas, dinámicos que ocurren en el mundo natural o social.

Los siguientes puntos tienen como objetivo explicar qué entendemos por sistemas complejos adaptativos y demostrar que nuestro sujeto de estudio: la población de empresas que actúan en un mercado se comporta como tal. En primer lugar, profundizaremos en el concepto de sistema, y en el cambio metodológico que propone la teoría de sistemas al descartar el reduccionismo por un enfoque basado en analizar la totalidad. Por otro lado, también se recogen las ideas sobre orden y desorden extraídas de la termodinámica de los sistemas abiertos, pues nos ayudarán a comprender, en el capítulo 5, qué significa la emergencia de orden, es decir, la autoorganización. En tercer lugar se repasarán las aportaciones de la teoría del caos o de la dinámica no-lineal. La dinámica característica de estos sistemas es no lineal e impredecible debido a los feedback que se producen entre los agentes participantes. La teoría del caos nos mostrará como ecuaciones muy simples pueden conducir a un alto nivel de complejidad. Por último, el estudio de la autoorganización en sí mismo, aquella rama que pretende entender la ruta del caos hacia el orden, será explorado en otros capítulos, dada su gran relevancia para esta investigación.

### **4.3 EL ENFOQUE DE SISTEMAS**

Mientras que la ciencia clásica era reduccionista, trataba de explicar los fenómenos observables reduciéndolos al juego de unidades elementales, investigadas de forma independiente unas de otras, por ejemplo la utilización de la conocida cláusula *ceteris paribus*, un nuevo enfoque trata de ocuparse de lo que vagamente se hace llamar “totalidad”. Cada vez en mayor medida la ciencia –sin importar que el objeto de estudio sean cosas inanimadas, organismos vivientes o fenómenos sociales– toma conciencia de que el todo no puede aprehenderse del estudio de las partes de forma aislada, Bertalanffy (1968, 1993, p.37).



El *enfoque de sistemas* surge de esta vocación y tiene como objetivo abordar el problema de la complejidad a través del análisis de la totalidad y sus propiedades, permite abordar cuestiones que el enfoque reduccionista no es capaz de explicar. Concretamente, el reduccionismo científico fracasa ante fenómenos que presentan las siguientes características:

- El número de variables interactuantes es mayor de las que el científico puede controlar, por lo que no es posible realizar verdaderos experimentos.
- La posibilidad de que factores desconocidos influyan en las observaciones es elevada.
- Y como consecuencia de los dos puntos anteriores, los modelos cuantitativos son muy vulnerables.

Los fenómenos que presentan estas características son especialmente comunes en las ciencias sociales donde la investigación debe tratar con gran número de factores humanos, económicos, tecnológicos y naturales fuertemente interconectados. En el caso de estas ciencias la dificultad se multiplica por la imposibilidad de llevar a cabo experimentos y por la propia intervención del hombre como sujeto y como objeto (racional y libre) de la investigación.

Como afirma Bertalanffy (1968,1993 pp. 17-18). «La aplicación efectiva del procedimiento analítico clásico depende de dos condiciones. La primera es que no existan interacciones entre las “partes” o que dichas interacciones sean tan débiles que puedan dejarse a un lado en ciertas investigaciones. Sólo con esta condición es posible “deslindar” las partes: real, lógica y matemáticamente y luego volverlas a “juntar”. La segunda condición es que las relaciones que describan el comportamiento de las partes sean lineales; sólo en este caso se cumple la condición de aditividad, o sea que existe una ecuación que describe la conducta del total que tiene la misma forma que las ecuaciones que describen la conducta de las partes, en este caso los procesos parciales pueden ser superpuestos para obtener el comportamiento del agregado o del todo. Estas condiciones no las cumplen los sistemas, consistentes en partes en interacción.»

Fueron, en primer lugar, los biólogos quienes se vieron en la necesidad de pensar en términos de *totalidades*. El estudio de los seres vivos exigía considerar a éstos como una jerarquía organizada en niveles, cada uno más complejo que el anterior. Los estudios mostraban, para cada nivel, la aparición de propiedades emergentes imposibles de explicar a partir de los componentes del nivel inferior, sencillamente porque dichas propiedades se derivan de la interacción, y no de los componentes individuales por si mismos. En la década de los 50 Von Bertalanffy proponía los fundamentos de una *Teoría de Sistemas Generales*. En 1968 publica su obra cumbre titulada *General System Theory: Foundations, Developement, Applications*<sup>23</sup>. La teoría general de sistemas afirma que las propiedades de los sistemas no pueden ser descritos significativamente en términos de sus elementos separados. La comprensión de los sistemas solamente se presenta cuando estos se estudian globalmente, involucrando todas las interdependencias de los subsistemas.

No solo las diversas ciencias de forma independiente han visto la necesidad de aprehender el todo más allá de las partes, sino que además, con frecuencia, los investigadores han encontrado leyes formalmente idénticas (isomorfas) en diferentes campos. Se observa que estas leyes valen para determinadas clases de “sistemas” sin importar la naturaleza de las entidades envueltas. Este descubrimiento de isomorfismos lleva a pensar en la posible existencia de leyes generales aplicables a cualquier tipo de sistema sin importar las propiedades particulares de éste, ni de los elementos en él participantes. Así, en palabras de Bertalanffy<sup>24</sup>(1993, p.32): «La *Teoría general de los sistemas* tiene como objetivo la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los sistemas en general». «Se trata de buscar principios aplicables a sistemas, sin importar que sean de naturaleza física, biológica o sociológica».

---

22. Ludwig von Bertalanffy (1968): “*General System Theory: Foundations, Developement, Applications*”, George Braziller, New York. Existe una traducción en español de la cuarta edición inglesa publicada en 1976, titulada “*Teoría General de los Sistemas*” y editada por Fondo de Cultura Económica, 1977.

23. Ludwig von Bertalanffy (1993): “*Teoría General de Sistemas*”, Fondo de Cultura Económica, Madrid, 3ª reimpresión de la primera edición en español de 1976.

Así, Bertalanffy (1968, 1993, p.14) determina como funciones principales de la teoría general de sistemas:

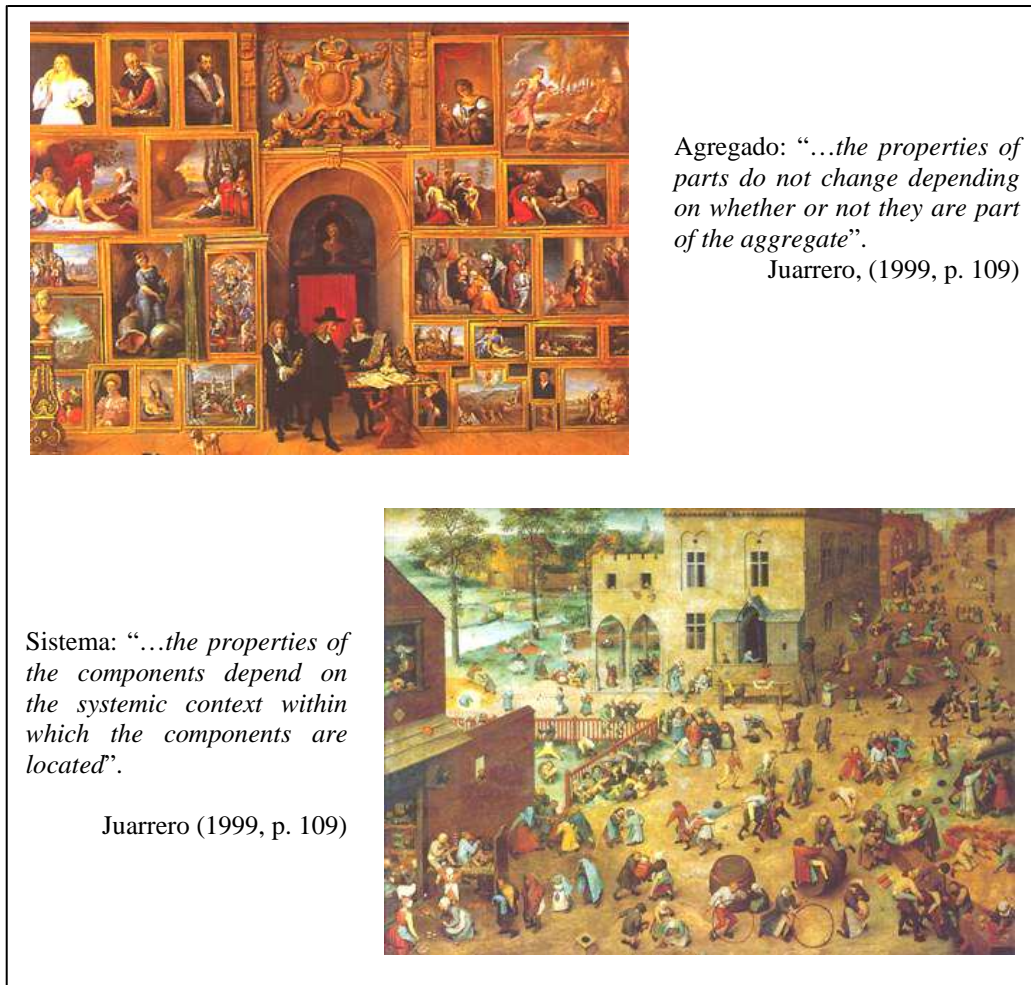
- 1) Investigar el isomorfismo de conceptos, leyes y modelos en varios campos y fomentar provechosas transferencias de un campo a otro.
- 2) Estimular el desarrollo de modelos teóricos adecuados en los campos que carecen de ellos.
- 3) Minimizar la repetición de esfuerzo teórico en diferentes campos.
- 4) Promover la unidad de la ciencia mejorando la comunicación entre especialistas.

La teoría general de sistemas propone la creación de modelos interdisciplinarios que trasciendan los compartimentos ordinarios de la ciencia y que sean aplicables a fenómenos en diferentes campos. Esto conduce al isomorfismo entre modelos, principios generales y aun leyes especiales que aparecen en varios campos. Como afirma Bertalanffy (1993, p.97), la inclusión de las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales en la tecnología moderna exige la generalización de conceptos científicos básicos, lo cual implica nuevas categorías de pensamiento científico en comparación con las de la física tradicional. Los nuevos modelos deben tener naturaleza interdisciplinaria.

### ***El concepto de sistema***

El concepto de sistema arranca del problema de las partes y el todo, ya discutido en la antigüedad por Hesíodo (siglo VIII a.C.) y Platón (siglo IV a.C.). Pero, sin embargo, el estudio de los sistemas como tales no fue objeto de interés hasta la segunda guerra mundial cuando se pone de relieve la necesidad del trabajo interdisciplinar y la existencia de analogías (isomorfismos) en el funcionamiento de sistemas biológicos y automáticos.

Las diferentes definiciones de sistemas desde el siglo XVII hasta la teoría general de sistemas reconocen dos rasgos esenciales: el primero, la interrelación entre los elementos y el segundo, la idea de unidad global constituida por estos elementos en interrelación.



**Figura 4.1. Agregados y sistemas**

Morín (1977, 1997, pp. 123-124) recopila varias definiciones de sistema que ponen el acento, unas, en el rasgo de totalidad o globalidad, y otras, en el rasgo relacional, destacando como más interesantes aquellas que unen el carácter global y el rasgo relacional:

- Un sistema es «un conjunto de partes», Leibniz <sup>25</sup>(1666);
- «todo conjunto de componentes definible», Maturana (1972);
- «un conjunto de unidades en interrelaciones mutuas», von Bertalanffy (1956).
- «unidad resultante de las partes en mutua interrelación», Ackoff (1960).
- «un todo (whole) que funciona como todo en virtud de los elementos (parts) que lo constituyen», Rapoport (1969).

Otras definiciones incorporan, además de estos dos rasgos ya comentados, el concepto de organización al de sistema. Así, Ferdinand de Saussure (1931) define un sistema como «una totalidad organizada, hecha de elementos solidarios que no pueden ser definidos más que los unos en relación a los otros en función de su lugar en la totalidad». En la misma línea Morín (1997, 1977, p.124) realiza la siguiente afirmación: «se puede concebir el sistema como unidad global organizada de interrelaciones entre los elementos, acciones o individuos».

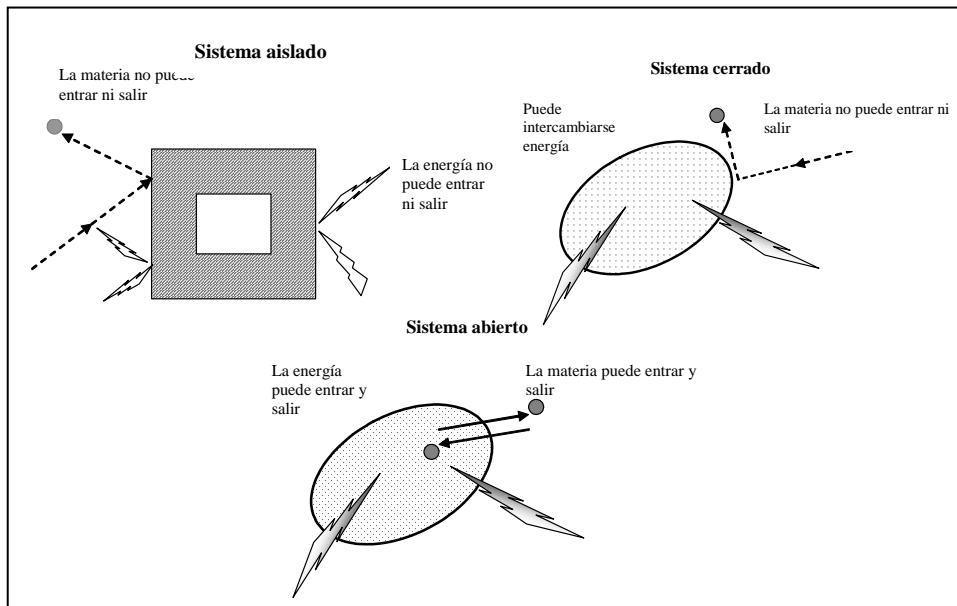
#### **4.4 LA TERMODINÁMICA DE LOS SISTEMAS CERRADOS Y LA TEORÍA DE LOS SISTEMAS ABIERTOS. ORDEN Y DESORDEN**

Todo sistema se encuentra inmerso en un medio ambiente que, en general, afectará tanto a su funcionamiento como a su rendimiento. Prigogine define tres tipos de sistemas: los sistemas aislados, cerrados y abiertos. Los sistemas aislados no pueden intercambiar ni materia ni energía con el mundo externo. Los sistemas cerrados pueden intercambiar energía (pero no materia) y los sistemas abiertos pueden intercambiar ambas cosas. «La tierra es un sistema cerrado si hacemos abstracción de las precipitaciones meteóricas y del polvo cósmico. La tierra recibe la radiación solar y estelar que irradia en parte hacia las regiones frías del espacio interestelar. El tercer tipo es el susceptible de intercambiar materia y energía con el mundo externo, es un sistema abierto. Un ejemplo de sistema abierto es la ciudad. Es evidente que actúa a modo de centro hacia el que

---

25. Este autor y los siguientes son citados en Morín (1997, pp. 123-124).

confluyen alimentos, combustibles, materiales de construcción, etc., y que por otro lado, expide productos acabados y residuos.» Prigogine (1983, 1997, p.221).



Fuente: Prigogine (1983,1997, p.221) y elaboración propia

**Figura 4.2. Sistemas aislados, cerrados y sistemas abiertos.**

La física ordinaria sólo se ocupaba de sistemas cerrados, es decir, de aquellos que se consideran aislados del medio circundante. En palabras de Bertalanffy (1993, p.39): «La termodinámica declara expresamente que sus leyes sólo se aplican a sistemas cerrados. En particular, el segundo principio de la termodinámica afirma que, en un sistema cerrado, cierta magnitud, la entropía, debe aumentar hasta el máximo y el proceso acabará por detenerse en un estado de equilibrio.» El segundo principio formulado por Clausius en 1850 afirma que la entropía (desorden) crece sin cesar, predice el decaimiento de todas las estructuras con el tiempo, tarde o temprano el orden dará paso al desorden. Si imaginamos una reacción química en la que se mezclan ciertos reactivos, la imagen clásica de la termodinámica nos dice que este sistema evoluciona hacia

una situación de equilibrio caracterizada por la máxima entropía y la homogeneidad. Una vez terminada la reacción, nada ocurrirá de nuevo: veremos una disolución homogénea, del mismo color, y nada más. «Así, todo incremento de entropía es un incremento de desorden interno, y la entropía máxima corresponde a un desorden molecular total en el seno del sistema, lo cual se manifiesta a nivel global por la homogeneización y el equilibrio.» Morín (1997, p.52).

Boltzmann desarrolla una aproximación del concepto de entropía basado en la probabilidad estadística. En el seno de un sistema, el número de moléculas y el número de configuraciones que se pueden dar son inmensas, pero quizás posibles de captar a partir de una aproximación probabilística. Desde esta perspectiva las configuraciones desordenadas son más probables y las configuraciones ordenadas las menos probables. Así, un incremento de entropía supone pasar de las configuraciones menos probables a las más probables, el desorden es debido a una mayor probabilidad de aparición. La entropía de Boltzmann fue más tarde introducida en ecología teórica por Margalef (1968), dándole el nombre de diversidad ecológica o simplemente de diversidad. La diversidad es una cuestión importante para este trabajo, pues es una característica presente en las empresas que operan en los mercados. Los ecosistemas reales no están constituidos por una sola especie (entropía = 0) ni por una distribución uniforme de individuos de cada especie, como ocurriría en un museo (entropía máxima). Como afirman Solé y Manrubia (1996, pp.21-22), los sistemas reales se encuentran a medio camino entre ambos extremos, parecen encontrar un balance entre ambas posibilidades. La vida genera constantemente diversidad y, por lo tanto, no debemos esperar encontrar sistemas de gran simplicidad (a menos que el medio ambiente lo imponga así). Como señala Margalef la diversidad es una expresión de la estructura resultante de la forma en la que interaccionan los elementos (especies) del sistema. Es, sin lugar a dudas, un elemento necesario para mantener una estructura compleja. Si la entropía es reducida, las posibilidades de mantener una estructura compleja se reducen. Así pues, desde la termodinámica aprendemos que la diversidad, el desorden, la entropía, es un fenómeno natural en los sistemas que permite la existencia de

estructuras complejas. Desde esta perspectiva, podemos afirmar que, en la economía la diversidad empresarial es una necesidad para la generación de un tejido empresarial sostenible.

Sabemos que el segundo principio de la termodinámica predice el decaimiento de todas las estructuras con el tiempo de manera que con el paso de éste lo ordenado dejará de serlo para dar paso al desorden. Sin embargo, a nuestro alrededor vemos miles de sistemas que exhiben un alto grado de orden. Concretamente, las predicciones del segundo principio de la termodinámica entran en contradicción con la ley de la evolución en la biología. De acuerdo con el segundo principio, la tendencia general de los acontecimientos en la naturaleza física apunta hacia estados de máximo desorden y a la igualación de diferencias con la llamada muerte térmica del universo. Como afirma Prigogine (1983, 1997, p.231): «Es evidente que los seres vivos muestran una organización que no es consecuencia de una evolución hacia el desorden molecular. El orden biológico es arquitectónico y funcional y, además, a nivel celular y supracelular, se manifiesta por una serie de estructuras y funciones acopladas de creciente complejidad y de carácter jerárquico. Esta noción es contraria al concepto de evolución descrita en los sistemas aislados y cerrados de la termodinámica, por lo tanto la termodinámica y Darwin parecen entrar en contradicción». Mientras que para Boltzman la evolución implica alejamiento de las condiciones iniciales y desorden, para Darwin la evolución supone orden. Prigogine (1997, p.234) resuelve esta contradicción, afirmando que las organizaciones biológicas y sociales implican un tipo de estructura de origen distinto a las estructuras de equilibrio como los cristales. Las estructuras sociales y biológicas son sistemas abiertos y su organización depende fundamentalmente del intercambio de materia y energía con el medio ambiente.

Prigogine permitirá superar la contradicción entre la termodinámica y la biología a partir de una nueva lectura de la segunda ley y para ello profundizará en el concepto de entropía, distinguiendo dos orígenes en ésta: una, la *producción de entropía interna* del sistema,  $dS_i$ , debida a procesos irreversibles y otra, el *flujo de entropía* que el sistema pueda intercambiar con su entorno,  $dS_e$ . Éste



segundo aspecto fue olvidado en la formulación de la segunda ley de la termodinámica centrada en el estudio de sistemas aislados que, por definición, no mantienen ningún tipo de intercambio con el exterior. Para los sistemas aislados los cambios de entropía vendrían determinados exclusivamente por el primer término: la producción de entropía que en estos casos es positiva, razón por la cual la entropía siempre tiende a crecer en estos sistemas. Pero, en el caso de los sistemas abiertos, la generación de entropía también puede provenir del segundo término, este flujo será distinto de 0 siempre que el sistema mantenga intercambios con el exterior. De manera que:

$$dS \geq 0$$

$$dS = d_i S + d_e S$$

En todos los procesos irreversibles la entropía debe aumentar, en los sistemas cerrados el cambio siempre provoca un aumento de entropía, pero en los sistemas abiertos no sólo hay creación de entropía debida a procesos irreversibles sino también entrada de entropía que puede ser negativa –llamada negentropía-. Tal es el caso de los organismos vivos y sociales que manteniéndose en un estado uniforme logran evitar el aumento de entropía y hasta pueden desarrollarse hacia estados de orden y organización crecientes, Bertalanffy (1993, pp.40-41). El desorden siempre acaba imponiéndose en un tiempo futuro pero en el transcurso de ese tiempo puede surgir la emergencia espontánea de orden complejo. «La tendencia a la desorganización, a la entropía o probabilidad creciente que anuncia la termodinámica se refiere sólo a sistemas totalmente aislados de su entorno. Un sistema capaz de intercambiar algo con su entorno (..) tiene su oportunidad para buscar estados menos probables», Wagensberg, (1986, p.145). De este modo, la noción de entropía de la termodinámica clásica y la noción de evolución de la biología darwiniana quedan reconciliadas.

Todos los organismos vivientes son sistemas abiertos que: «se mantienen en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio químico y termodinámico, sino manteniéndose en un estado llamado uniforme que difiere

de aquél. Tal es la esencia misma de ese fenómeno fundamental en la vida llamado metabolismo, los procesos químicos dentro de las células vivas.» Bertalanffy (1997, p.39). Sabemos que la economía y cada agente económico: las empresas o los consumidores, son sistemas abiertos que se mueven entre el orden y el desorden, perviven porque son capaces de generar “algo” de orden que controle la creciente entropía.

Sin embargo, como veremos en el capítulo 5, el requisito de sistema abierto no es condición suficiente para la aparición de estructura, –o de orden–, esto sólo es posible cuando el sistema se encuentra alejado del equilibrio y si existen ciertos tipos de mecanismos no lineales que actúen entre los distintos elementos del sistema.

## **4.5 SISTEMAS Y MACROSISTEMAS**

Recordamos que el objetivo de esta tesis es tratar de avanzar en las posibles explicaciones de una regularidad estadística observable al nivel del conjunto de empresas que actúan en un mercado. Es una regularidad observable a nivel del macrosistema, el formado por las empresas ubicadas en un espacio, bien una región, un país, o de territorios más amplios. En este apartado concretaremos las características diferenciales de nuestro sujeto de estudio: el sistema formado por empresas, al que quizás deberíamos llamar sistema productivo.

### ***4.5.1. Jerarquía de sistemas***

Como afirma Chiavenato (2001, p.709): «Los sistemas son jerárquicos o piramidales, están constituidos de sistemas o subsistemas relacionados entre sí por un proceso o estándar de interacción. El universo es un sistema constituido por una infinidad de sistemas y subsistemas íntimamente relacionados, los cuales conforman una jerarquía de sistemas».

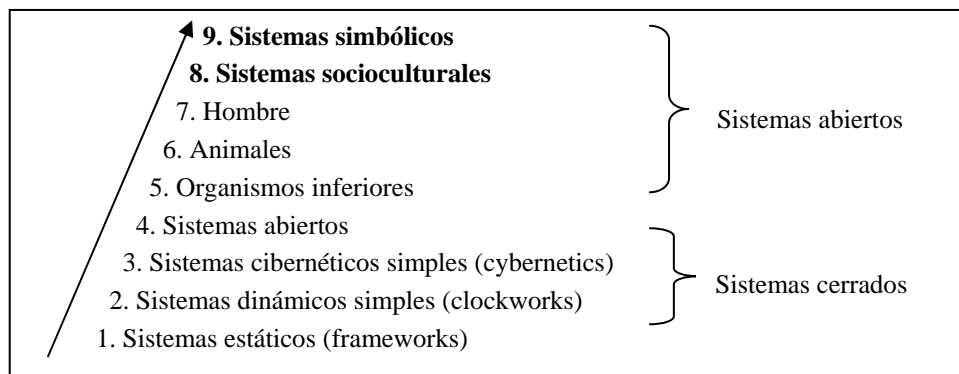
Boulding (1956)<sup>26</sup> propone una jerarquía de nueve niveles en función de su complejidad:

1. Nivel de los sistemas estáticos (frameworks), compuestos de estructuras y armaduras. Es el nivel más estudiado y el que tiene mayor número de descripciones; por ejemplo, el sistema solar.
2. Nivel de los sistemas dinámicos simples (clockworks), compuestos de movimientos predeterminados e invariables, como los mecanismos de relojería, las palancas, las poleas, etc. Son los sistemas predecibles por naturaleza, propios de las ciencias naturales clásicas, como la física y la química.
3. Nivel de los sistemas cibernéticos simples (cybernetics) o mecanismos de control. Es el caso del termostato, en el cual el sistema mantiene su equilibrio por autorregulación dentro de los límites establecidos. Este nivel ha recibido mucha atención.
4. Nivel de los sistemas abiertos, de existencia autónoma y autorregulable. En este nivel comienza la diferenciación entre la vida y la no vida, entre lo orgánico y lo no orgánico. Es el nivel de la célula, de los sistemas de circuito abierto con estructuras autónomas y capacidad de reproducción.
5. Nivel genético-societario de la vida vegetal, integra el mundo de la botánica. En estos sistemas se produce una división del trabajo entre las células formadoras de las sociedades de raíces, hojas frutos, etc. Su prototipo es la planta.
6. Nivel del sistema animal que se caracteriza por el aumento de la movilidad y el comportamiento teleológico. Los órganos sensoriales captan informaciones a través de receptores (ojos, oídos, etc.) que luego son enviados al sistema nervioso, lo que permite al cerebro organizar la información tomando en cuenta la movilidad y el comportamiento.
7. Nivel humano, o sea la criatura humana considerada como un sistema que posee conciencia de sí misma y capacidad de utilizar el lenguaje y el simbolismo en su comunicación.

---

<sup>26</sup> Kenneth Boulding: *General Systems Theory: The Skeleton of Science.*, en *Management Science*, abril 1956, citado en Chiavenato (2001, p.709)

8. Nivel del sistema social o sistema de organización humana. En este caso la unidad no es el individuo, sino el rol que desempeña en relación con la organización o con la situación. Las organizaciones sociales son conjuntos de roles reunidos en sistemas mediante sus respectivos canales de comunicación.
9. Nivel de los sistemas trascendentales. Son los sistemas superiores, absolutos, inevitables, pero ignorados o conocidos apenas parcialmente en virtud de su excesiva complejidad. Sin embargo, también obedecen a una estructura semántica lógica.



Fuente: Chiavenato (2001, p. 710)

**Figura 4.3. Jerarquía de sistemas**

A medida que se asciende hacia los niveles más elevados, la teoría se vuelve precaria e insuficiente de manera progresiva. Nuestro macrosistema se encontraría en el nivel más elevado de la clasificación de Boulding. Comprender el funcionamiento de este tipo de sistemas pasa por conocer las interacciones que se producen a un nivel inferior, el de los agentes, en nuestro caso las empresas. Éstas ocupan el nivel anterior en la clasificación antes descrita.

#### 4.5.2. Funcionamiento de los sistemas abiertos

Dentro del estudio de sistemas, los que para nosotros tienen objeto de interés son los sistemas abiertos, aquellos que intercambian materia y energía con el ambiente. Se trata de sistemas adaptativos que para sobrevivir deben readaptarse constantemente a las condiciones del medio. Mantienen un juego recíproco con las fuerzas del ambiente, la calidad de su estructura se optimiza cuando el conjunto de elementos del sistema se organiza en una operación adaptativa. El concepto de sistema abierto puede aplicarse en diversos niveles: el individuo, el grupo, la organización, o la sociedad, yendo desde un microsistema hasta un macrosistema. En términos más amplios podemos afirmar que los sistemas abiertos van de la célula al universo, (ver figura 4.3.)

Los macrosistemas formados por empresas, al igual que las empresas ( u organizaciones) que los forman son sistemas abiertos. Se trata de sistemas formados por elementos dinámicamente relacionados en una red de comunicaciones (interacciones entre los elementos), que realiza una actividad (procesamiento del sistema), con el fin de alcanzar un objetivo o propósito (finalidad del sistema). Dicho objetivo lo consiguen al operar sobre datos/energía/ materia (insumos o entradas de recursos para que el sistema opere) y proveer información/energía/materia (salidas o productos del sistema), Chiavenato (2001, p.706).



Fuente: Chiavenato (2001, p.774)

**Figura 4.4. Modelo general de sistema abierto**

En el sistema empresa los elementos dinámicamente relacionados son los recursos: el personal que participa en la empresa, los equipos y otros inputs; la actividad de procesamiento consiste en la transformación (metabolismo) de los inputs importados mediante la utilización de sus recursos. La empresa exporta el producto transformado (output) fuera del sistema a cambio de “dinero”, la transformación debe ser capaz de generar un valor del output suficiente para poder adquirir más recursos y retribuir satisfactoriamente al grupo. El dinero puede ser considerado para el sistema empresa, como la energía para el sistema físico. En este contexto el sistema debe, necesariamente, adaptarse a un entorno en continuo cambio, por ejemplo, la entrada de nuevos actores o sea el incremento de la competencia o los continuos cambios en los gustos de los consumidores. Y a medida que el sistema logra realizar intercambios con el entorno, obtiene información acerca de éste, información que le permite desarrollar aquellas estrategias exitosas capaz de adaptarse al entorno continuamente cambiante.

A diferencia de otros sistemas, las organizaciones sociales, no tienen límites en su amplitud. Están vinculadas a un mundo concreto de seres humanos, recursos materiales, fábricas y otros artefactos, aunque estos elementos no se encuentran en ninguna interacción natural entre sí. El sistema social es independiente de cualquier parte física determinada, y puede aligerarla o sustituirla, es la estructuración de eventos o acontecimientos, no la estructuración de partes físicas. En tanto que los sistemas físicos o biológicos tienen estructuras anatómicas que pueden ser identificadas, los sistemas sociales no pueden representarse a través de modelos físicos. Existe una enorme diferencia entre la estructura socialmente planeada del sistema social y la estructura física de la máquina o del organismo humano y del sistema físico o biológico. Por otro lado, los sistemas sociales tienen mayor variabilidad que los sistemas biológicos, Chiavenato (2001, p.789).

Los límites del sistema, en nuestro caso quedan determinados por el espacio geográfico que consideremos. Forman parte del sistema las empresas establecidas como residentes en un territorio determinado. Los consumidores y el

resto de empresas de otros mercados, además de otros tipos de agentes como las instituciones públicas forman el entorno. Los agentes mantienen intercambios tanto con otros agentes del sistema como con agentes externos. En el capítulo anterior demostramos que la regularidad estadística observada en la distribución del tamaño de las empresas, la ley de Zipf, se cumple para diferentes espacios, es invariante de escala: aunque la forma de la distribución cambie al considerar diferentes poblaciones, el comportamiento de ley potencial es robusto. Los límites del sistema quedarán definidos por nosotros en función de la amplitud que le demos al sistema, una ciudad, una provincia, un país, la Unión Europea o si fuera posible la Economía Mundial (en este último caso se trataría de un sistema cerrado). La ley potencial también es observable en la distribución del tamaño de las empresas de una misma rama de actividad. Esto nos debe llevar a pensar que las posibles explicaciones también deben tener cierto carácter general, deben aparecer independientemente de muchas de las peculiaridades de las poblaciones estudiadas.

Los grandes sistemas como los mercados o la biosfera son los más complejos. Son sistemas formados por multitud de agentes, en nuestro caso empresas, que a su vez son sistemas altamente complejos, entre los que se producen continuamente intercambios de múltiples formas. Y es a partir de estos intercambios como el sistema procesa la información. Llegados a este punto, debemos tener en cuenta que no es lo mismo entender como funciona el sistema empresa a como lo hace el macrosistema. Las características específicas de los entornos no parecen impedir la aparición de esta regularidad, parece pues que las explicaciones del fenómeno deberemos buscarlas en el funcionamiento interior del sistema, por ello es fundamental conocer que tipo de reglas caracterizan las interacciones que se producen entre los elementos participantes.

#### **4.6 LA TEORÍA DEL CAOS O DE LA DINÁMICA NO-LINEAL**

Los sistemas complejos entre los que se encuentra, el sistema formado por empresas, presentan una dinámica no lineal, debido a la existencia de gran cantidad de agentes y de procesos de retroalimentación. En este sentido parece importante revisar los fundamentos de aquella rama de la ciencia que se encarga

precisamente de estudiar el comportamiento no lineal, más comúnmente conocida como teoría del caos.

El concepto de caos ha estado presente en prácticamente toda la historia de la humanidad a través de las leyendas que han acompañado a las distintas civilizaciones antiguas. Como mencionan Briggs y Peat (1994, p.19) «Los pueblos antiguos<sup>27</sup> creían que las fuerzas del caos y el orden formaban parte de una tensión inestable, una armonía precaria. Pensaban que el caos era algo inmenso y creativo».

La teoría del caos ligada a la incorporación de los fenómenos no-lineales supondrá una importante transformación conceptual y metodológica en muchos campos científicos. Heredera de los descubrimientos de Pointcaré sobre el problema de los tres cuerpos. La teoría comienza a tomar forma con los trabajos de Lorenz y su descubrimiento sobre la importante *sensibilidad de las predicciones a las condiciones iniciales* a medida que aumenta el periodo de predicción. Este hecho fue bautizado con el nombre del *efecto mariposa*: una mariposa volando en un extremo del planeta modifica, a largo plazo, el pronóstico del tiempo atmosférico (no del clima) en el otro extremo. La trascendencia de este descubrimiento ha provocado que la teoría del caos o de la complejidad se asocie vulgarmente al efecto mariposa, o que se la defina como la sensibilidad de la dinámica a las condiciones iniciales. Pero no debe entenderse así, ya que esta última no es más que una característica de primer orden en el estudio de los sistemas complejos. En estos sistemas ninguna de las múltiples variables de las que depende o por las que se caracteriza puede ser descrita a la perfección, el mínimo error en la medición de las condiciones iniciales, para una sola de ellas, lleva a errores amplificados. Si consideramos el efecto multiplicado de los errores correspondientes a la medición del conjunto de variables, la

---

27. «En una historia cosmogónica china un rayo de luz pura, ying, surge del caos y constituye el cielo mientras la pesada opacidad restante, yang, configura la Tierra. Ying y Yang, el principio femenino y masculino, luego actúan para crear las 10.000 cosas –en otras palabras todo-. Además es significativo que los principios del ying y del yang aun después de haber emergido, conservan las cualidades del caos del cual surgieron. Un exceso de ying o de yang nos devolverá al caos». Briggs y Peat (1994, p.19).



predictibilidad de la dinámica del sistema es prácticamente imposible. Tal es el caso de las sociedades humanas, Boya *et al* (1990, pp 21-22).

En palabras de Stewart, (1989, p. 22): «El caos es considerado como un tipo de comportamiento de sistemas que pese a estar determinados por leyes totalmente deterministas exhiben un comportamiento aparentemente aleatorio. Es un comportamiento estocástico que ocurre en un sistema determinista.» Para Edward Lorenz (1993, p.2): «con el término caos nos referimos a procesos que parecen comportarse de acuerdo con el azar aunque, de hecho, su desarrollo esté determinado por leyes bien precisas». También pueden incluirse «fenómenos que son ligeramente aleatorios, siempre que su mayor aleatoriedad aparente no sea un subproducto de su leve y auténtica aleatoriedad» *Ibid* (p. 3).

Los resultados de Lorenz mostraban también que el caos, derivado de la dinámica no lineal, no es un caos absoluto. En este tipo de sistemas, de entre la infinidad de soluciones virtualmente posibles, el sistema muestra predilección por un grupo reducido de ellas, es atraído por ellas. Hay ciertas regiones del *espacio de fases*<sup>28</sup> por las que el sistema muestra predilección, estas regiones se denominan *atractores*. Un *atractor* es un subconjunto del espacio de fases en torno al cual se estabiliza el sistema. Atrae hacia sí al conjunto de estados posibles haciendo que el sistema se estabilice en torno suyo, Stewart (1989, pp. 114-116). Los *atractores extraños*, como el de Lorenz, tienen una forma geométrica extremadamente compleja, normalmente *fractal*, Ruelle, (1993, pp. 70-71); Boya *et al*, (1990, p.41). La localización de atractores se produjo gracias a la utilización de la computadora como herramienta científica. La existencia de estos es una propiedad sumamente interesante de los sistemas dinámicos no lineales, aunque esto no quiere decir que todos los sistemas dinámicos contengan atractores.

---

28. Es la representación gráfica del conjunto de estados que el sistema puede adoptar en función de los valores de los parámetros que lo definen.

#### **4.6.1. Mandelbrot y la geometría fractal**

Al igual que fueron acogidas las ideas de la mecánica newtoniana, originando paradigmas para la interpretación causal de todo tipo de fenómenos a lo que, por supuesto, no fue ajena la economía. También la geometría euclidiana, que representaba la interpretación de un orden a través de figuras basadas en cuerpos regulares era de gran aceptación. Sin embargo, a través del tiempo habían quedado sin contestar demasiadas dudas respecto a como interpretar y describir muchas formas de la naturaleza –por ejemplo, las nubes, los árboles, las siluetas caprichosas de las montañas o la medición del perímetro de una costa– que parecían imposibles de describir a partir de la geometría euclidiana. El matemático Mandelbrot desarrolló una nueva geometría que él mismo acuñaría con el nombre de geometría fractal que permitirá reinterpretar y aportar mucha más luz a la geometría del mundo que nos rodea, (ver capítulo 2).

Dentro del nuevo espíritu científico, con el siglo XX, surgen en el campo de la matemática figuras muy destacadas, John von Neumann, Alan Turing, Norbert Wiener, Claude Shannon, Kolmogorov, Bachelier y Levy. Heredero en mayor o menor medida de todos ellos, Benoît Mandelbrot emprenderá, a partir de las nuevas concepciones científicas emergentes, un vasto programa interdisciplinar de investigaciones en matemática aplicada que le llevará a transitar por multitud de campos científicos, comenzando por la teoría de la información, la computación y los juegos, siguiendo por la lingüística, la psicología y la economía, y más tarde por la hidrodinámica, la geofísica, la mecánica de fluidos, la cosmología y la infografía, Izquierdo (1998, p.2).

El amplio trabajo de Mandelbrot establecerá un inusitado y fructífero puente de traducción entre tres ramas periféricas y otrora inconexas de las ciencias matemáticas: el análisis estadístico de procesos estocásticos y series temporales (el área excavada durante las décadas de 1920-30 por Lévy, Kolmogorov y Wiener), el análisis geométrico de las formas infinitamente irregulares (cuyos precursores dispersos son las "figuras monstruosas" de Cantor, von Koch, Peano y Sierpinski), y el álgebra conjuntiva de la iteración de

funciones en el espacio complejo (desarrollada a principios de este siglo por los matemáticos franceses Gaston Juliá y Pierre Fatou). Este puente es hoy archifamosamente conocido como la teoría de *los objetos fractales* (Mandelbrot, 1987 y 1997, 1982).

El término fractal, del latín fractus que significa “roto” o “quebrado”, fue introducido por Mandelbrot para designar objetos geométricos de estructura irregular, interrumpida o fragmentada que poseen dos propiedades especiales: la autosemejanza y la dimensión fractal. La Real Academia Española aceptó la palabra como “fractal” y la define de la siguiente manera: «Figuras geométricas virtuales, formadas por un número infinito de elementos infinitamente pequeños, contenidos en una superficie finita. Se pueden representar con la ayuda de ordenadores, siguiendo determinados algoritmos. Así llega a ponerse de manifiesto la regularidad oculta de modelos de fenómenos naturales que aparentemente son desordenados». Sin embargo, el uso y la costumbre en el ámbito internacional han impuesto el término de “fractal”. Actualmente sabemos que la fractalidad es una característica de muchos sistemas dinámicos complejos que se mueven entre el orden y el desorden aleatorio. Como vimos en el capítulo 2, la estructura fractal contiene leyes potenciales.

Los objetos fractales se caracterizan por tener una estructura autosemejante. Aunque el término fue creado para figuras en el espacio en muchos casos se aplica también al comportamiento de ciertos fenómenos, así se suele decir que la distribución del tamaño de las empresas tiene un comportamiento fractal, (ver capítulo 3, apartado 3.3).

#### **4.6.2. Del orden al caos y del caos al orden.**

En general, podemos distinguir dos enfoques ya clásicos en los estudios del caos: uno que trata de explorar la ruta del *orden al caos* y otro que explora la posible ruta que conduce del *caos al orden* y que constituye objeto de interés para el presente trabajo. El primero de ellos, el que explora la *ruta del orden al caos*, se centra en el orden oculto que existe dentro de los sistemas con dinámicas caóticas (sistemas caóticos). El foco de interés de este primer enfoque se halla en

el propio caos y no tanto en las estructuras organizadas que de él emergen. Los sistemas contienen *atractores extraños*, patrones de orden que manifiestan un alta y rica organización allá donde parecía existir sólo aleatoriedad y reinar el azar. Entre los máximos representantes de este enfoque encontramos a autores tan significativos como Edward Lorenz, Mitchell Feigenbaum y Benoît Mandelbrot.

El segundo enfoque, centra su atención en el surgimiento espontáneo de orden, de la *autoorganización*, es decir de las estructuras que surgen cuando los sistemas están lejos del equilibrio y la producción de entropía es elevada. En el análisis de una ruta que conduce del caos al orden hay una figura que destaca sobre las demás, Ilya Prigogine, quien desarrolla un trabajo de carácter más filosófico y menos experimentalista que otros enfoques, pero sin embargo, con mayor trascendencia. Las aportaciones de Prigogine en el campo de la autoorganización se desarrollarán en el siguiente capítulo.

El descubrimiento de la teoría del caos estuvo en la vanguardia en la comprensión de los sistemas dinámicos no lineales. Hoy, la ciencia del caos es una ciencia de la complejidad en la medida en que los sistemas complejos se caracterizan por exhibir una conducta no lineal. La física clásica consideraba los sistemas complejos como sistemas que, cuando se dispusiera por fin de las herramientas analíticas suficientemente poderosas, exigirían descripciones complejas. Sin embargo, los estudios derivados del reciente interés por los sistemas dinámicos no lineales muestran que tal presunción es incorrecta; estos sistemas pueden ser complejos pero quizás estén generados por un conjunto relativamente simple de procesos. En algunos casos puede que en los sistemas existan pocos elementos en interacción produciendo un comportamiento muy divergente –caos determinista– en otros casos, las interacciones en un sistema dinámico producen un orden global emergente con todo un conjunto de propiedades fascinantes, Lewin (1995, p.25). Las investigaciones sobre la distribución del tamaño de las empresas se enmarcan en esta segunda categoría.

#### 4.7 SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS

«Complexus quiere decir, lo que está tejido en conjunto; la trama, el tejido de constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados que presenta a la vez la paradoja de lo uno y lo múltiple. Tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares que constituyen nuestro mundo fenoménico».

Morin (1997p. 32)

Las empresas que actúan en los mercados pueden ser consideradas como un sistema complejo adaptativo. Hasta ahora hemos visto que el conjunto de empresas que actúan en una economía forman un sistema, formado por multitud de agentes que a su vez son sistemas, ambos, abiertos, por los que continuamente están realizando intercambios con el entorno. La dinámica del macrosistema no es lineal debido a los feedback que se producen derivados de las interacciones de los agentes (agentes). Aunque hemos dicho que tanto el macrosistema como la empresa son sistemas complejos, no hemos determinado con suficiente profundidad que significa ser “complejo”.

La física de partículas elementales trata de elementos que se comportan exactamente igual, independientemente del lugar que ocupen en el universo. Todos los electrones son rigurosamente intercambiables, por ello se dice que el electrón al igual que el resto de partículas elementales no tienen individualidad. Cuando se piensa en la física, por lo menos, los profanos en la materia, solemos creer, aunque no es del todo correcto, que las leyes de la física de partículas son exactas, universales e inmutables. Por el contrario, en disciplinas como la arqueología, la lingüística, la sociología o la economía, las leyes son aproximadas, pues a diferencia de la física de partículas, los diferentes objetos de estudio de estas ciencias si tienen individualidad. Desde esta perspectiva, las leyes universales de la física son extremadamente simples, mientras que el estudio de la evolución biológica, de la sociología o de economía entran en el campo de lo complejo, del estudio de la individualidad; identificando lo simple con lo universal y lo complejo con lo particular.

Las leyes universales de la física son simples porque somos capaces de comprender su funcionamiento y su papel en el universo, como por ejemplo la ley de la gravitación universal. Sin embargo, no es posible este tipo de conocimiento cuando entramos en el campo de lo complejo. El estudio de la economía entra de lleno en el este último caso: los agentes que forman la economía presentan individualidad y comportamiento complejo. Supongamos que tratamos de analizar el éxito empresarial, que queremos extraer, a partir del estudio del comportamiento de las empresas, un paquete de “leyes universales”, un diseño de conducta que una vez aprehendido por las empresas asegure su éxito. Quizás estas leyes existan, pero no las podremos deducir del análisis de los resultados empresariales. Las empresas reales tanto las que alcanzan éxitos como fracasos son organismos individuales, deben sus resultados a su adaptación al medio ambiente que es producto tanto del cumplimiento de unas reglas, que el medio ambiente exige, como de una gran cantidad de hechos azarosos que habrán condicionado su historia. Las empresas son sistemas que se mueven entre el orden y el desorden. Hay unas reglas pero a su vez hay gran cantidad de azar que genera diversidad e individualidad. La visión reduccionista de la ciencia, centrada en la “simplicidad” únicamente trataba de interpretar y comprender la realidad a partir del estudio de las regularidades y universalidades, anulando la existencia de los hechos azarosos e históricos que marcan la individualidad y el estudio de lo complejo.

Weaver (1948) considera que los desarrollos de la investigación científica de los últimos siglos podían ser clasificados en tres grandes campos. En primer lugar, el estudio de sistemas simples: problemas de dos o tres variables, tales como la rotación de los planetas o la conexión entre una corriente eléctrica y su voltaje y resistencia. En segundo término, problemas de “complejidad desorganizada” caracterizados por millones o miles de millones de variables cuya única posible aproximación es a través de mecánica estadística y teoría de probabilidades. Entre los sistemas simples y la complejidad desorganizada que estudia la mecánica estadística hay una zona intermedia que se encuentra entre las ecuaciones de dos incógnitas y los problemas que encierran miles de millones de variables. En este último tipo de sistemas mucho más importante que el número

de variables es el hecho de que las variables están interrelacionadas. Si además el sistema exhibe un rasgo esencial de organización hablamos de “complejidad organizada” cuyos misterios están siendo más fáciles de desvelar con el desarrollo de la informática, como ya pronosticó Weaver.

En la naturaleza existen muchísimos ejemplos de sistemas complejos que van desde las reacciones químicas autocatalíticas, hasta los procesos sociales y culturales. La naturaleza posee una fuerte tendencia a estructurarse en forma de entes discretos excitables que interactúan y se ordenan en niveles jerárquicos de creciente complejidad. Como síntesis, enumeramos dos características inherentes al estudio de estos sistemas complejos:

1. La idea de que el comportamiento global no es reducible a la suma de las partes del sistema o al comportamiento típico o medio de un constituyente del sistema. Como ejemplo podría decirse que el comportamiento global de la sociedad no es reducible (visión reduccionista) a la psicología individual de sus componentes, cuyas características individuales detalladas pueden ser irrelevantes para el comportamiento colectivo.
2. El comportamiento complejo se refiere a una situación intermedia entre el desorden aleatorio o caótico y una situación bien ordenada. Por ejemplo, el crecimiento y organización espacial de una ciudad dista por igual de tener una distribución aleatoria que de seguir las pautas con que se organiza un asentamiento militar. La razón es que los propios ciudadanos se autoorganizan en el desarrollo de la ciudad. De hecho, la observación y el sentido común sugieren que la mayoría de los fenómenos que ocurren en la escala de las actividades diarias humanas muestran un balance delicado entre orden y desorden.

Aunque existan innumerables ejemplos de sistemas complejos, tanto físicos, químicos o sociales, esta amplia diversidad no tiene porque implicar que existan muchas conductas dinámicas diferentes. Todo lo contrario, el enfoque de los sistemas complejos advierte que estos poseen propiedades genéricas

independientemente de los detalles específicos de cada sistema, de ellos emergen fenómenos globales y colectivos semejantes, sin que los detalles materiales del sistema sean del todo relevantes. El enfoque de la complejidad mantiene que es posible identificar propiedades dinámicas similares entre un ordenador, el sistema nervioso, el sistema inmunológico, la tectónica de placas, el tamaño de los asentamientos humanos, o el tamaño de las empresas.

Al observar los sistemas complejos podemos distinguir entre aquellos que son *adaptativos*, que experimentan procesos como el aprendizaje y la evolución biológica, de aquellos otros que experimentan otros tipos de evolución no adaptativa como las galaxias o las estrellas. Algunos ejemplos de sistemas complejos adaptativos pueden ser un niño aprendiendo su lengua materna, una cepa de bacterias volviéndose resistente a determinado antibiótico o una empresa actuando en el mercado.

Estos sistemas muestran una tendencia general a generar otros sistemas de la misma categoría. Así, la evolución biológica, por ejemplo, puede conducir tanto a soluciones “instintivas” de los problemas que debe afrontar un organismo, como al desarrollo de una inteligencia suficiente para resolver los mismos problemas mediante el aprendizaje. De forma similar, los individuos se agrupan para trabajar en empresas que se comportan como sistemas complejos adaptativos cuyo objetivo es la obtención de unas ganancias que aseguren la permanencia en el mercado. El conjunto de empresas que interactúan y compiten en un mercado forman a su vez un sistema complejo adaptativo, (ver figura 4.5.).

En palabras de Gell-Mann (2003, p.36): «Cuando alguien planea una nueva aventura comercial, mejora una receta o aprende un lenguaje, se está comportando como un sistema complejo adaptativo. Cuando uno invierte en bolsa se convierte, junto con los otros inversores, en un sistema complejo adaptativo que forma parte de una entidad colectiva en evolución a través de los esfuerzos de todos sus componentes para mejorar su posición o, por lo menos, para sobrevivir económicamente. Tales entidades colectivas organizadas, del tipo de empresa o tribu, constituyen sistemas complejos adaptativos en sí mismas.».

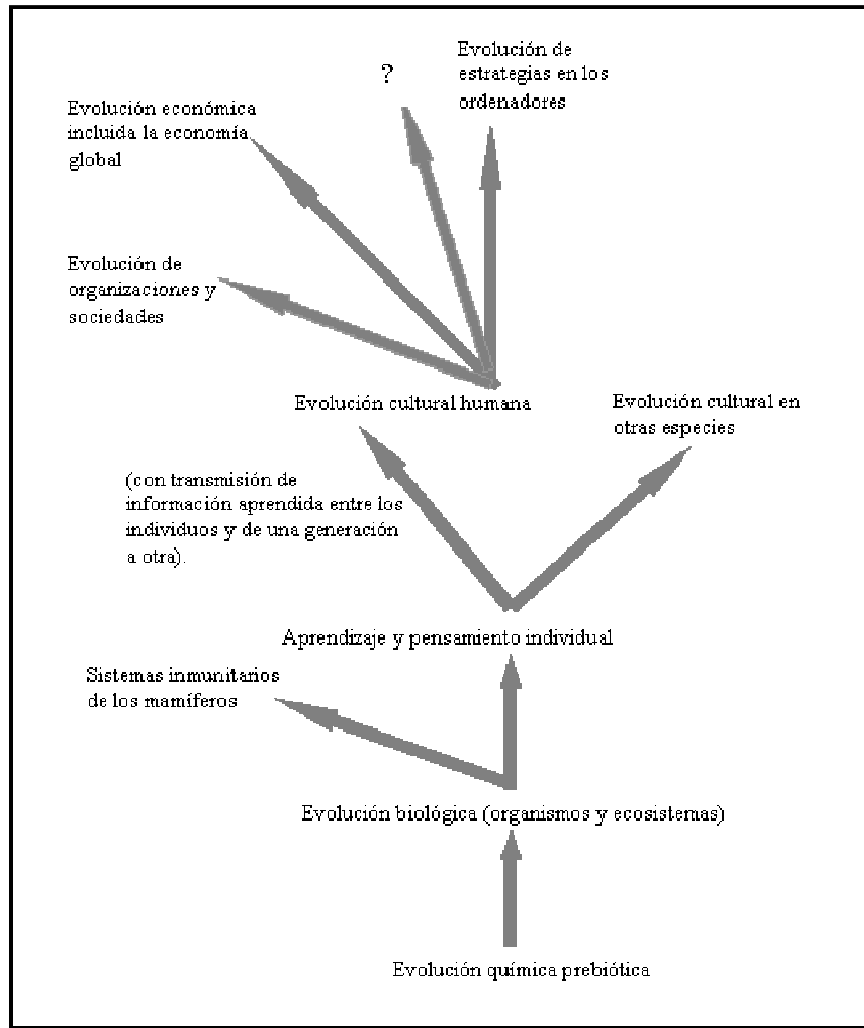


En los sistemas complejos donde el orden y el azar coexisten, el sistema debe extraer regularidades entre lo aleatorio. Como ejemplo, en la construcción de la gramática interna de un niño existen ciertas regularidades o reglas que el niño identifica a través de la experiencia al oír a otras personas hablar. Sin tener plena conciencia de ello, los niños, elaboran un conjunto provisional de reglas acerca de lo que es gramaticalmente correcto y de lo que no. Después, a medida que continúan escuchando enunciados gramaticalmente correctos y ensayan ocasionalmente enunciados que les son corregidos, van modificando el conjunto de reglas, (ver figura 4.6.). Sin tener, necesariamente, plena conciencia identifican las regularidades y la aleatoriedad.

En relación con las regularidades y la aleatoriedad en un sistema complejo adaptativo surge el concepto de *complejidad efectiva*, que se define como la longitud del esquema utilizado para describir las regularidades del sistema, Gell-Mann (2003, p.73). Podremos emplear el término “complejidad efectiva interna” de un sistema cuando exista un esquema que de algún modo gobierne el objeto de discusión como en el caso de la gramática inscrita en el cerebro que regula el habla. O los mecanismos (o más bien procesos) que operan en el mercado, a los que se refiere Adam Smith con su la metáfora de la mano invisible.

Si en un sistema considerado no se encuentran regularidades de ninguna clase, no sería posible encontrar algún esquema que describiese esa regularidad o dicho de otra forma el único esquema posible tendría longitud cero, asignando este valor a la complejidad efectiva del desorden aleatorio en estudio. En el otro extremo, se encontrarían aquellos sistemas que exhiben una enorme regularidad, por ejemplo imaginemos que analizando la distribución del tamaño de las empresas en una localización, observamos que todas ellas tienen el mismo tamaño, o que en el caso del lenguaje todas las palabras tienen la misma frecuencia de aparición. En estos casos la complejidad efectiva –la longitud del esquema que describe las regularidades– también debería ser próxima a cero, ya que el mensaje todo vale “x” es muy corto. Para que la complejidad efectiva tenga un valor apreciable el contenido de información algorítmica que describe un sistema no deber ser ni demasiado bajo ni demasiado alto; o en otras palabras, el sistema

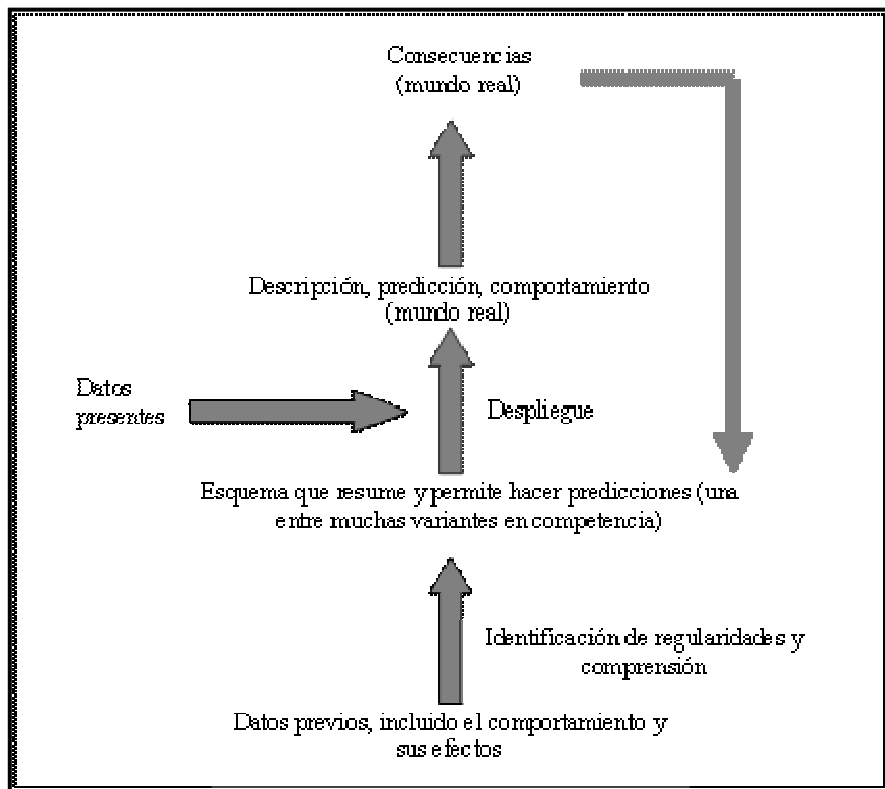
no debe estar ni demasiado ordenado ni demasiado desordenado. Tiene que haber lugar para el orden y el desorden. Las empresas deben cumplir unas ciertas “reglas” si quieren permanecer en el mercado –deben tener solvencia, liquidez o rentabilidad– pero estas reglas son posibles en un contexto de cierto desorden. Esta es la esencia de la complejidad.



Fuente: Gell Mann (2003, p.38)

**Figura 4.5. Algunos sistemas complejos adaptativos del planeta Tierra.**

Hace ya algún tiempo Herbert Simon, se valió de los movimientos de las hormigas en la búsqueda de comida para ilustrar el sentido de lo que hoy Gell-Mann llama complejidad efectiva. La trayectoria seguida por una hormiga puede parecer compleja, pero sin embargo, las reglas que dirigen la búsqueda son simples. La intrincada trayectoria de la hormiga manifiesta una elevada complejidad algorítmica, de la que sólo una pequeña parte es atribuible a las reglas que subyacen a las regularidades de la búsqueda. Pero esta pequeña parte constituye –al menos aproximadamente– la totalidad de la complejidad efectiva. El contenido de la información algorítmica restante, el grueso de la complejidad aparente, es resultado de rasgos aleatorios del terreno explorado por la hormiga.



Fuente: Gell-Mann (2003, p.41)

**Figura 4.6. Funcionamiento de un sistema complejo adaptativo.**

Las empresas, como sistemas complejos deben su comportamiento al seguimiento de una serie de reglas junto a gran cantidad de hechos azarosos, que marcan su individualidad. Determinar la complejidad efectiva del sistema pasa por definir conductas universales para todas las empresas, separar el orden del puro azar.



## **CAPÍTULO 5**

# **TEORÍAS DE LA AUTOORGANIZACIÓN**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

El término autoorganización tiene su origen en el campo de la cibernética y se utilizó inicialmente para designar la emergencia de patrones de orden que surgían espontáneamente en los experimentos con modelos de redes binarias. La utilización del término se generalizó entre los investigadores de la teoría de sistemas y fue H. Forester el principal responsable de su difusión con la creación de un grupo de investigación interdisciplinar. Las ideas iniciales se difundieron a diversos campos científicos como la biología, la física y la química. A diferencia de los modelos cibernéticos iniciales, los modelos posteriores incluyeron la creación de nuevas estructuras y nuevos modos de comportamiento considerando el aprendizaje y la evolución, Saura (2003, p.227).

La autoorganización o la emergencia de orden espontáneo es una cuestión que ha sido abordada desde campos muy diversos. Cada rama de la ciencia exploró la autoorganización con planteamientos propios de su campo. Así pues, hoy por hoy, existen diferentes formas de aproximarse al concepto. Más allá de los desarrollos realizados en la física y la química, la autoorganización ha tenido una importante difusión en las ciencias de lo vivo tanto en la biología como en las ciencias sociales. Podemos decir que las aportaciones más significativas y que mayor aceptación han tenido, en el desarrollo posterior de trabajos que profundizan en la emergencia de orden, se han desarrollado desde cuatro campos o líneas: en primer lugar, los descubrimientos de Prigogine en el marco de la termodinámica de sistemas abiertos; en segundo lugar, la vida en el borde del

caos de Langton y Packard; en tercer lugar, la física de los sistemas complejos y la criticalidad autoorganizada de Bak, y por último, la teoría de redes.

## 5.2 LA AUTOORGANIZACIÓN DESDE LA TERMODINÁMICA DE LOS SISTEMAS ABIERTOS

Aunque la cibernética nunca llegó a convertirse en una disciplina principal o central, gran parte de sus ideas, tales como retroalimentación y autoorganización, están hoy vivas y tienen una influencia creciente en el pensamiento científico. Ilya Prigogine y sus colaboradores han demostrado como los sistemas físicos y químicos pueden exhibir conductas autoorganizativas típicas de los sistemas biológicos. Como veremos, bajo las condiciones correctas ciertas reacciones químicas -como la reacción Belousov-Zhabotinski- pueden exhibir determinadas pautas espaciales (espirales) o temporales (cambios de color periódicos) que son una muestra de estructura u orden.

En 1850, el físico alemán Rudolf Clausius proponía los principios básicos de la termodinámica. El primero de ellos establecía que la energía del Universo permanece constante, aunque suele ser más conocida aquella otra formulación que declara que la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. Sin embargo, Clausius observó que en cualquier intercambio térmico se producen inevitables pérdidas de calor, y también pérdidas en la posibilidad de utilización de esta energía. En la naturaleza los cuerpos calientes se enfrían y no al revés, cuando locomotora del siglo XIX consumía carbón mineral para su funcionamiento era evidente que tras el uso del carbón la energía había cambiado de tal manera que una vez utilizada para mover la máquina ya no era aprovechable. En palabras de Atkins (1984, p.9): «aunque la cantidad total de energía debe conservarse en cualquier proceso (...), la distribución de esta energía cambia de una forma irreversible». Esta transformación de la energía que la hace no aprovechable es lo que conduce a Clausius a formular el segundo principio: *la entropía del Universo aumenta hasta su valor máximo*. El término entropía, que significa en griego transformación, la define Hayles (1990) como una medida de

la pérdida del calor (energía) para fines útiles; Atkins (1984) añade que la entropía recogería el sentido natural del cambio en la distribución de la energía.

A finales del siglo XIX, el físico inglés James Clerk Maxwell reinterpretará la segunda ley dándole una definición probabilista. Maxwell que trabajo con las velocidades moleculares de un gas planteó que aunque nada impide la acumulación de todas las moléculas en una determinada zona del espacio, este hecho era altamente improbable, siendo por el contrario muy probable el desorden molecular. Como ya introducimos en el capítulo anterior, más tarde el físico austriaco Ludwig Boltzman reinterpretará a Maxwell ampliando el concepto de entropía considerándola como una medida de la aleatoriedad o de desorden en un sistema cerrado, y propondrá una formulación para su cálculo. En la visión de Boltzman «mientras más mezclado o aleatorio sea el estado final, más probable será, porque habrá mas configuraciones que conduzcan a él y, en consecuencia, será más entrópico», Hayles, (1990, p. 63). La entropía es el alejamiento de las condiciones iniciales. La interpretación probabilista de la entropía tiene la ventaja, frente a la interpretación basada en la pérdida del calor, de permitir extender el concepto a contextos que nada tienen que ver con intercambios térmicos.

### ***5.2.1. Tipos de sistemas: sistemas en equilibrio, cercanos al equilibrio y alejados del equilibrio***

Para Prigogine<sup>29</sup> un sistema abierto puede existir en tres tipos de regímenes según su posición de equilibrio. En primer lugar, se encuentran los sistemas en equilibrio termodinámico, cuando los flujos y corrientes han eliminado diferencias de temperatura o de concentración y la entropía ha alcanzado un nuevo y mayor valor. En este estado el sistema llega a la uniformidad. En segundo lugar, encontramos los sistemas con estados próximos al equilibrio donde las variables del sistema difieren poco de las del estado de equilibrio y donde existe un comportamiento lineal, pues se establece una relación de proporcionalidad entre

---

29. Ver: Nicolis y Prigogine, (1977); Prigogine y Stengers, (1979); Prigogine, (1980,1983, 1993,1997).



el desorden molecular y el diferencial de temperatura respecto al equilibrio. En tercer lugar, los sistemas abiertos pueden encontrarse en una posición lejos del equilibrio, en este estado las ligaduras que el sistema mantiene con su entorno le obligan a alcanzar estados lejos del equilibrio.

Sabemos que el estado de equilibrio (termodinámico) es aquel en el que el sistema alcanza el máximo nivel de entropía<sup>30</sup>. Concentrándonos en este tipo de equilibrio, imaginemos dos recipientes conectados en los que tenemos nitrógeno, en uno de los ellos, e hidrógeno, en el otro. La segunda ley actúa y, con el tiempo, ambos gases acabarán mezclados, remitiendo las diferencias de concentración de los recipientes y alcanzando su estado de equilibrio. En éste todos los flujos y fuerzas son nulos, y se alcanza un estado de uniformidad. Por ejemplo, un cristal, una vez formado, es un típico sistema en equilibrio, el cual ya no necesita de flujo alguno proveniente del medio para mantenerse. Un sistema en equilibrio es un sistema muerto, Jou y Llebot, (1989).

Si calentamos uno de los recipientes de tal forma que mantengamos una ligera diferencia de temperatura entre ambos, el nitrógeno y el hidrógeno se mezclarán pero no de manera uniforme. Habrá más nitrógeno en uno de los recipientes y más hidrógeno en el otro. En este caso la diferencia de temperatura produce cierto orden, lo que llamamos un estado *cercano al equilibrio* donde el flujo es una función lineal de la fuerza (en nuestro ejemplo, el intercambio molecular de hidrógeno y nitrógeno es proporcional a la diferencia de temperatura que mantengamos). Se trata de estados en los que la producción de entropía, de desorden, es mínima, y además compatible con las ligaduras impuestas al sistema. Cualesquiera que sean las condiciones iniciales, el sistema alcanza finalmente el estado cercano al equilibrio que las condiciones le están imponiendo. En el caso de sistemas cercanos al equilibrio, las reacciones del sistema son perfectamente predecibles. Si aumentamos la diferencia de temperatura obtendremos más pureza en los gases situados en cada uno de los

---

30. El equilibrio termodinámico difiere de otro tipo de equilibrio, el mecánico, que podríamos definir como «un estado especial en el que tanto las velocidades como las aceleraciones de todas las masas puntuales son iguales a cero», Nicolis y Prigogine (1987, p.83)

recipientes. Si igualamos las temperaturas, obtendremos una mayor mezcla del hidrógeno y del nitrógeno. Tanto en los sistemas en equilibrio como en los cercanos al equilibrio podemos describir un estado que actúa como *atractor* del sistema. Además dada la linealidad y reversibilidad existente en este tipo de procesos es posible la realización de predicciones tanto de momentos futuros como de momentos pasados. Pero estas características sólo están presentes en el caso de sistemas próximos al equilibrio. Por el contrario, las empresas y las economías son sistemas alejados del equilibrio según el enfoque termodinámico, están continuamente intercambiando energía con el sistema, recogen inputs los transforman y exportan outputs.

<b>Sistemas según la termodinámica</b>		
<b>En Equilibrio</b>	<b>Cerca del Equilibrio</b>	<b>Alejados del Equilibrio</b>
Uniformidad: sin diferencias de concentración. Los flujos y las fuerzas son nulos	Estados lineales: el flujo es función lineal de la fuerza.	Estados no lineales
Estados de máxima entropía	Producción de entropía mínima	Continua producción de entropía, dados los continuos intercambios con el medio
Atractor: el estado de máxima entropía	Atractor: el estado de generación de mínima entropía	Sin atractor aparente
Sean cuales sean las condiciones iniciales el sistema evoluciona hacia su estado atractor		Minúsculas diferencias en las condiciones iniciales generan evoluciones distintas
Las fluctuaciones remiten debido a la existencia de atractores		Las fluctuaciones se amplifican: surge un orden por fluctuaciones: las estructuras disipativas.
Los procesos son reversibles		Los procesos son irreversibles (barrera entrópica)
Concepción del tiempo como reversible		Concepción del tiempo como unidireccional. El tiempo tiene flecha.

**Cuadro 5.1. Diferencias más significativas entre los diferentes tipos de sistemas según su posición de equilibrio.**

En los dos estados de los que hemos hablado, sistemas en y cerca del equilibrio, hay pocos intercambios con su entorno (por ejemplo, pequeñas diferencias de temperaturas mantenidas entre los recipientes). Sin embargo, en situaciones en las que el sistema sufre grandes intercambios de energía o de materia con el exterior nos dicen Prigogine y Stengers (1975, p. 87) que: «el equilibrio no es posible, por darse procesos disipativos que continuamente producen entropía.» Prigogine descubre que a partir de cierta distancia del equilibrio, de cierto alejamiento del equilibrio, el orden emerge del caos; pues tras pasado un umbral pueden aparecer estructuraciones, es decir, emerger sistemas nuevos.

Dos ejemplos, paradigmáticos, de sistemas alejados del equilibrio estudiados en química, son *la reacción Belousov-Zhabotinsky*, o *reacción BZ* y *la inestabilidad de Bénard*. Estos ejemplos permiten comprender los planteamientos de Prigogine sobre la aparición de orden espontáneo en sistemas fuera del equilibrio.

La reacción *Belousov-Zhabotinsky* es una típica reacción oscilante que se produce al mezclar una serie de componentes químicos<sup>31</sup> en concentraciones y temperaturas determinadas. Una vez provocada la reacción química, y después de pasar por un período de mezcolanza de componentes, van apareciendo espirales desde el centro hacia fuera que van creciendo y, a su vez, cambiando paulatinamente de un color azulado a un rojizo para volver a ser azulado y así de manera repetida y a intervalos regulares, Epstein, Kustin, De Kepper y Orbán, (1990). Igualmente, si se roza la reacción, el punto que se ha tocado se convierte en el origen de otra espiral de anillos que competirá con la que ya existía para abarcar toda la reacción. Durante mucho tiempo se pensó que ésta reacción violaba las leyes de la naturaleza. En lugar de tender hacia un estado de uniformidad y mezcla entre sus componentes, el sistema tendía hacia un estado donde aparecían estructuras ordenadas y oscilatorias a modo de un perfecto reloj químico. La reacción *Belousov-Zhabotinsky* es un claro ejemplo de la aparición de orden espontáneo en fenómenos químicos.

---

<sup>31</sup>. En su versión original ácido malónico, bromato, iones de cerio y ácido sulfúrico.



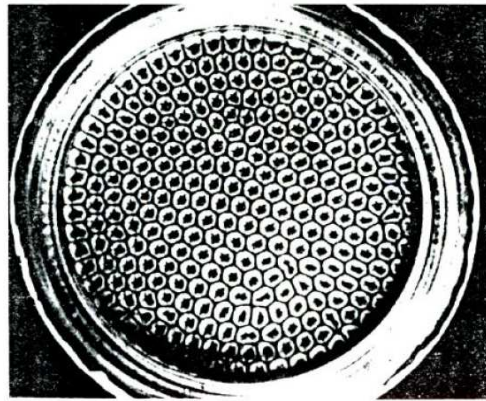
La secuencia de imágenes está presentada de arriba e izquierda hacia abajo y derecha.

Fuente: Prigogine (1980, p. 200)

***Figura 5.1. Ejemplo de sistema alejado del equilibrio: reacción de Belousov-Zhabotinsky.***

El segundo ejemplo que proporciona la química de sistemas alejados del equilibrio es la inestabilidad de Bénard que se consigue al calentar de una manera uniforme desde su parte inferior un recipiente con fluido viscoso, por ejemplo, helio. Conforme se intensifica el calor, y a un determinado nivel de temperatura, comienzan a parecer de manera espontánea células de convección con una

estructuración muy regular. Esto corresponde a un alto nivel de organización molecular en el que la energía se transfiere desde la agitación térmica a corrientes de convección macroscópicas. Dicha configuración permanece mientras suministremos temperatura al sistema. En cuanto deja de alimentarse, tal estructuración comienza a difuminarse y el sistema alcanza su estado de equilibrio. La inestabilidad de Bénard constituye otro excelente ejemplo, y también a un nivel químico, de cómo, por encima de un valor crítico de temperatura, ciertas fluctuaciones se amplifican y dan origen a corrientes macroscópicas generadoras de un orden molecular. Es un buen ejemplo para mostrarnos la existencia de estructuras, de orden, que surge y se mantiene gracias a los intercambios de energía que estos sistemas mantienen con el exterior, en condiciones de inestabilidad y de alejamiento del equilibrio, Prigogine (1972).



Fuente: Prigogine, (1986, p.162).

***Figura 5.2. Otro ejemplo de sistema alejado del equilibrio: la inestabilidad de Bénard***

Prigogine resuelve la contradicción entre la termodinámica clásica y la biología. Explica que la primera es aplicable a sistemas cerrados y que en los sistemas abiertos el aumento de entropía no solo conduce a la muerte térmica sino que es capaz de generar orden o estructura. El aumento continuo de entropía es lo que permite la supervivencia del sistema.

### **5.2.2. Sistemas autoorganizados y estructuras disipativas**

Hoy, en el contexto de la formulación “prigoginiana” de los sistemas alejados del equilibrio, se concibe a la reacción BZ y la inestabilidad de Bénard como claros ejemplos de sistemas autoorganizados que emergen de unas condiciones iniciales peculiares que mantienen al sistema alejado del equilibrio. En palabras de Prigogine (1982, p. 32-33) «el orden se genera a partir del caos a través de condiciones de no equilibrio». «En un estado alejado del equilibrio, la materia tiene propiedades radicalmente nuevas.» Prigogine, entrevista concedida a Briggs y Peat, (1989, p. 139).

Mientras que en los sistemas en y cerca del equilibrio las fluctuaciones remitían, en los sistemas alejados del equilibrio no sólo pueden eventualmente no remitir, sino que pueden aumentar y arrastrar al sistema hacia nuevas configuraciones, en este último caso diremos que se produce un *orden por fluctuaciones*. El sistema experimenta una transformación adoptando un modo de funcionamiento distinto, estructurado en el tiempo y en el espacio y funcionalmente organizado. El orden por fluctuaciones conduce hacia una *estructura disipativa*, Prigogine y Stengers, (1975).

La estructura disipativa es la fluctuación amplificada y estabilizada por las interacciones con el medio. Contrariamente a las estructuras en equilibrio, como un cristal, las estructuras disipativas sólo pueden mantenerse si se nutren de manera continua de aportes de energía y de materia que sostienen los procesos disipativos. Para la aparición de estas estructuras se precisa también de la existencia de ciertos tipos de mecanismos de interacción no lineal que actúen entre los elementos del sistema. Para que la no linealidad pueda optar entre varias soluciones posibles, es necesario rebasar ciertas dimensiones espaciales críticas.

Los sistemas descritos por Prigogine sólo pueden existir porque constantemente están recibiendo energía del sistema que después disipan. Pero en este proceso de absorber energía y disiparse, es cuando el sistema va adquiriendo estructura (orden). La denominación de *estructura disipativa* pretende reflejar la aparente contradicción que estas estructuras presentan al disipar de manera

constante energía mientras conservan su estructura gracias a las interacciones que mantienen con el medio, Nicolis y Prigogine, (1977).

### 5.2.3. Estructuras inertes y seres vivos

Sabemos, por la segunda ley de la termodinámica, que en los sistemas abiertos se produce un continuo incremento de entropía y que el sistema a la larga tenderá a generar la máxima entropía. Si lanzamos una gota de tinta en agua, (un sistema inerte), inicialmente podremos determinar donde se encuentra exactamente la gota de agua y cual es su estructura pero conforme el tiempo pase la gota se disipa, de manera que, poco a poco, dejaremos de identificar la estructura inicial hasta que será imposible su determinación. Prigogine explica que los sistemas vivos, a diferencia de los inertes, son capaces de recoger información en el proceso de disipación de manera que con esta información son capaces de generar orden. En el contexto de la termodinámica, Prigogine nos enseña la diferencia entre seres vivos e inertes: los primeros son capaces de obtener información de la disipación y a partir de ella generar estructuras que aseguren su supervivencia. En este contexto, es necesario matizar que los sistemas no crean información la recuperan, la tornan disponible para el sistema bajo la forma de cambios irreversibles de su estructura.

Los sistemas vivos y sociales son sistemas dependientes de su historia caracterizada por la irreversibilidad. Es precisamente ésta la que permite distinguir el paso del tiempo y generar información a partir de la asimilación de los cambios producidos en la estructura. A pesar de que la 2º ley de la termodinámica es la misma para todos los sistemas físicos, en el caso de los sistemas inertes la disipación de energía acaba con el orden en los mismos, por el contrario, en los sistemas vivos la disipación es precisamente la que permite garantizar el orden y una creciente organización.

En fin, los seres vivos y las organizaciones formadas por estos, como los sistemas económicos, cuentan con información, y con ella generan su propia estructura, o, con otras palabras, se autoorganizan. Aunque esta tendencia es

opuesta al desorden, la existencia de sistemas autoorganizados no implica que éstos dejen de cumplir con la segunda ley pues la tendencia general es hacia una creciente entropía, los sistemas vivos sólo representan una tendencia local y transitoria hacia el orden. La disipación de energía, que incrementa la entropía de los sistemas físicos inertes hasta acabar con los mismos, es la fuente de la información que sostiene la creciente organización de los seres vivos. En este sentido Margalef (1974) afirma: «Los seres vivos cumplen con la segunda ley, pero ello, lejos de ser su "certificado de defunción", es la garantía de su creciente orden y diferenciación», y Hayles (1990) añade: «Las estructuras disipativas aprovechan la entropía, El orden, no surge a pesar de los procesos disipativos ricos en producción de entropía sino precisamente debido a ellos.».

En resumen, la termodinámica descubre que existen sistemas que se autoorganizan, que generan orden espontáneo. Éste orden, asociado a la generación de estructuras, requiere como condición que el sistema se encuentre alejado del equilibrio, disipando continuamente energía. Desde un enfoque termodinámico podríamos considerar que las empresas y los macrosistemas en que éstas participan son sistemas alejados del equilibrio que continuamente están captando información y disipando energía. En el sistema formado por empresas, las empresas ensayan las estrategias y de los resultados, captan más información del entorno. En el caso del sistema que se encuentra en un nivel superior: el conjunto de empresas como un todo, la distribución de ley potencial observada en la distribución del tamaño puede ser considerado la manifestación de un orden emergente de autoorganización. El orden se deriva de las interacciones de los agentes en un sistema que se encuentra alejado del equilibrio. La disipación de la energía en este caso se corresponde con la generación del output que el sistema expulsa al entorno.

Aunque los conceptos de la termodinámica han sido de gran utilidad para avanzar en el conocimiento de los procesos de autoorganización, su aplicación al campo de las ciencias sociales es complicada, pues la autoorganización (desde la termodinámica) está muy ligada a la generación de estructura en el ámbito de la física y la química. Sin embargo, las ideas desarrolladas por la Escuela de



Bruselas pueden ayudarnos a conceptualizar y aceptar la posibilidad de que los sistemas a partir de los agentes que los forman y de sus interacciones puedan generar de forma espontánea ciertos comportamientos o pautas observables a nivel del sistema social como un todo. Esto podría ocurrir en sistemas abiertos alejados del equilibrio como los sistemas formados por empresas.

### **5.3 LA AUTOORGANIZACIÓN DESDE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD.**

El tratamiento formal de los fenómenos autoorganizativos que parte de de las ciencias de la complejidad es cualitativamente diferente al termodinámico. Tiene sus raíces históricas en la cibernética y ciencia de sistemas de los años cincuenta que, apoyándose en las similitudes formales entre organismos y máquinas trató de caracterizar los fenómenos vitales en términos regulativos y de control, haciendo abstracción de los procesos físico-materiales que los soportan, Wiener (1948), Bertalanffy (1968). La “Segunda Cibernética” von Foerster, surgida en los años sesenta, orientó la cuestión de la autoorganización hacia la búsqueda de sistemas abstractos que pudieran aparecer ante un observador como capaces de generar nuevas formas de organización imprevisibles o, por lo menos, no fácilmente predecibles por el mismo. El éxito de la Escuela de Bruselas, encabezada por Prigogine, hizo que este tipo de trabajos sobre autoorganización quedara relegado a un segundo plano, sin embargo, el reciente auge de las “ciencias de la complejidad”, han vuelto a poner de relevancia esa visión abstracta de la autoorganización de la tradición cibernética.

Desde la perspectiva de los sistemas complejos, la autoorganización se considera como un fenómeno de formación espontánea de patrones que se manifiesta en sistemas formados por un gran número de elementos en interacción, Casti (1994). La autoorganización, en este caso, no se considera como un fenómeno únicamente físico-material como en la Escuela de Bruselas, sino que es la expresión de propiedades formales emergentes en este tipo de sistemas. La ventaja de esta aproximación es precisamente ésa, su universalidad.

Al no depender del sustrato material específico, los modelos autoorganizativos pueden aplicarse a sistemas tan dispares como avalanchas en montañas de arena, Bak (1996); formación de tipos celulares en el desarrollo biológico, Kauffman (1993) y Kaneko (2003); el comportamiento de colonias de hormigas Solé, Miramontes, y Goodwin (1993) o consistir ellos mismos en un modelo natural a estudiar Waldrop (1992).

### ***5.3.1. Autoorganización desde la física: sistemas críticamente autoorganizados***

La autoorganización en física, está directamente relacionada con las leyes potenciales. La física de los sistemas complejos ha estudiado que ciertos sistemas, en algunos casos, se sitúan en regímenes críticos caracterizados por la aparición de una distribución de frecuencia de fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles. Los fenómenos críticos en física representan un caso particular de las denominadas *transiciones de fase*. Siempre que un sistema físico pasa de una fase, o estado, a otra, decimos que experimenta una transición. En está, las propiedades físicas del sistema cambian; muchas transiciones de fase son fácilmente observables, el agua que hierve, la naftalina que se evapora, o el hielo que se funde. En estos casos la geometría del sistema y sus propiedades cambian debido a la transición, las dos fases del sistema están claramente diferenciadas. Sin embargo, en la transición y después de ésta, están fuertemente mezcladas. Está claro que ha habido un cambio en la geometría, en el tipo de homogeneidad que el sistema presenta antes y después. Pero, justo en el punto en el que tiene lugar la transición, llamado crítico, la coexistencia de las dos fases presenta una estructura fractal, en este caso las fluctuaciones se distribuyen como una ley potencial. En el estado crítico existen fluctuaciones que abarcan todas las escalas de tiempo y también de espacio, por lo que se hace terriblemente difícil establecer valores exactos promediados sea en el tiempo o en el espacio, Solé y Manrubia (1996, p.273).

Aunque inicialmente los estados críticos venían asociados a cambios de fase, donde las fluctuaciones de ley potencial –libres de escala– aparecían solo

para determinadas variables del sistema que el físico debía ajustar muy finamente, hoy sabemos que a nuestro alrededor se observan multitud de sistemas y fenómenos que exhiben leyes potenciales por lo que no parece razonable pensar que éstas sólo aparecen en los cambios de fase. Los posteriores desarrollos en física han llegado a la conclusión de que estos sistemas o fenómenos, denominados *críticos*, pueden alcanzarse de manera espontánea y sin la intervención de factores o fuerzas externas al sistema, en este caso se habla de un *proceso autoorganizado*. La existencia natural de sistemas, en o cerca del punto crítico, implica que debe haber algún mecanismo que los empuje a este punto como resultado de la dinámica intrínseca de las relaciones entre los componentes y el medio. De las interacciones entre los elementos constituyentes emerge un comportamiento –o estructura– de ley potencial que no puede ser explicada por los elementos constituyentes. En este sentido la conducta potencial –o los fenómenos libres de escala– se consideran una emergencia común en muchos sistemas que recibirán el nombre de *críticamente autoorganizados*.

*La metáfora de la pila de arena.*

La idea germinal sobre la posible tendencia espontánea de algunos sistemas a un punto crítico caracterizado por la presencia de leyes de escala, concepto conocido como *criticidad autoorganizada*, data de 1988, y se debe al danés Per Bak y a dos de sus colaboradores, Chao Tang y Kart Wiesenfeld.

La aplicación inicial del concepto de *criticidad autoorganizada* consistió en el estudio de montones de arena como los que podemos ver en el desierto o en la playa. Los montones son aproximadamente cónicos y cada uno de ellos tiene una pendiente más o menos bien definida. Las pendientes de los diferentes montones tienen, casi todas, el mismo valor. ¿Cómo se forman estas pilas o montañas? Supongamos que el viento u otro agente en un laboratorio deposita constantemente granos de arena sobre los montones, al crecer el montón la pendiente lateral aumenta pero solamente hasta un valor crítico. Una vez que se alcanza la pendiente crítica, la adición de más granos de arena produce avalanchas que disminuyen la altura del montón. Si la pendiente es mayor a la crítica

se produce una situación inestable en la que las avalanchas se dan con frecuencia reduciendo la pendiente hasta que su valor desciende por debajo del crítico. Los montones de arena se ven atraídos de modo natural hacia el valor crítico de la pendiente sin que sea precisa ninguna influencia externa, de aquí el nombre de *criticalidad autoorganizativa*, Gell-Mann (2003, p.114); y dicha pendiente crítica o dicho estado es un atractor, Solé y Manrubia (1996, p.311). Por otro lado, la experiencia revela que cuando el valor de la pendiente está próximo al crítico, los tamaños de las avalanchas –medidos por el número de granos que participan en ella– siguen aproximadamente una distribución de ley potencial.

La metáfora de la pila de arena nos dice que muchos sistemas tienden hacia un estado de equilibrio dinámico, en éste el sistema mantiene un estado *metaestable* que, a su vez, es compatible con una dinámica inestable, pues la adición de un único grano de arena puede provocar desde la caída de un solo grano hasta la precipitación de todo el montón. En principio, las ideas de criticidad autoorganizada de Bak parece que pueden ser aplicables a nuestro sistema objeto de estudio. En los sistemas formados por empresas, es decir, en los mercados, aparecen las dos condiciones descritas: el sistema tiende hacia un estado metaestable representado por la ley potencial compatible con una situación de inestabilidad, continuamente están entrando y saliendo empresas del mercado. Además como ya sabemos, en el caso de la distribución del tamaño de las empresas, la ley potencial es robusta ante las olas de fusiones y adquisiciones y ante grandes crisis y desapariciones a gran escala.

Bak y Chen (1991), plantean que los grandes sistemas interactivos se autoorganizan de tal forma que llegan a un estado crítico en el que un acontecimiento banal puede dar lugar a reacciones en cadena capaces de producir auténticas catástrofes. Lo realmente significativo es que los sistemas (como la pila) crecen hasta alcanzar un estado crítico en el que se hace posible la aparición de fenómenos catastróficos. El montón de arena nos sirve de paradigma de sistema en el borde del caos. Por un lado, el sistema es inestable en muchos puntos locales como lo demuestra la existencia de las avalanchas. Mientras que,

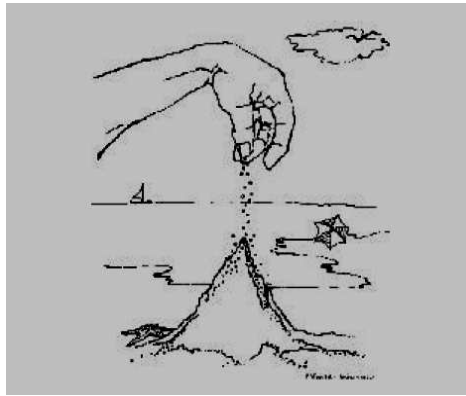
por otro, el estado crítico alcanzado es robusto, constituye un estado atractor de las configuraciones posibles del montón.

La “teoría de la criticalidad autoorganizada” ha tenido una relevancia importante en campos relacionados con las ciencias de la naturaleza, entre otros éxitos, ha logrado explicar la evolución sísmica de la corteza terrestre retomando hallazgos anteriores que apuntaban a que la distribución de los epicentros de terremotos está descrita por fractales, Scholz (1982). Sin embargo, pese a la potencia visual que tiene la metáfora de la pila, y lo atractivas que resultan las ideas sobre *criticalidad autoorganizada*, la aplicación de una metáfora –que trata del comportamiento de sistemas inertes– a la comprensión del funcionamiento de sistemas sociales y económicos no parece muy apropiada, pues, la economía y la sociedad, a diferencia de sistemas como el que representa la pila, están formadas por agentes adaptativos con capacidad de tomar decisiones a partir de la situación del entorno. Pese a ello, estas limitaciones pueden ser superadas si se piensa en la pila únicamente como una metáfora de conducta atractora, de algo que emerge de forma espontánea y que solo es observable en el macronivel (la pila). Concretamente, la macroconducta observable por los modelos de Bak responde a distribuciones de la intensidad de eventos o sucesos con comportamiento potencial.

La coincidencia, por un lado, de los desarrollos sobre la pila y la criticalidad autoorganizativa, y, por otro, el conocimiento por parte de diversos investigadores de una clara evidencia a favor de una distribución de ley potencial para diversos fenómenos relacionados con la dinámica de las empresas, parece ser razón suficiente para comprender por qué los modelos de criticalidad autoorganizativa han despertado interés y se han aplicado al campo económico. Actualmente existen trabajos que tratan de estudiar el comportamiento de los mercados (especialmente las empresas que forman el mercado) a partir del enfoque de los sistemas críticamente autoorganizados, SOC (*Self Organization Criticality*), utilizando esta denominación para designar a aquellos sistemas formados por muchos agentes en interacción, que evolucionan o son atraídos hacia un punto llamado crítico, en el cual se producen eventos de extinción que

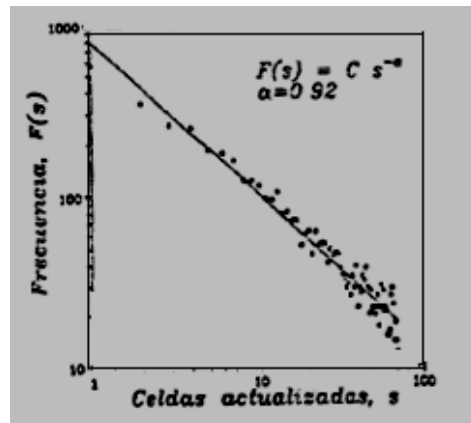
responden a leyes potenciales. El sistema a su vez es autoorganizado porque la emergencia de ese orden o estructura se produce de forma espontánea a partir de las interacciones entre los agentes.

Aunque existe una línea que aplica los modelos SOC al estudio de fenómenos económicos, existen importantes reticencias a la aplicación de estos planteamientos de la física de los sistemas complejos al campo de la economía. Los sistemas que estudia la física, estas formados por elementos inanimados, donde las propiedades y la estabilidad del sistema dependen de aspectos relacionados con variables como la forma de los granos o la posición que estos ocupan. Pero al margen de estas cuestiones, la limitación fundamental de los modelos físicos es el carácter inanimado de los agentes y por ende su incapacidad para tomar decisiones. Parece pues lógico pensar que los sistemas formados por seres vivos serán una referencia más aproximada al tipo de sistemas objeto de interés.



Fuente: Bak (1996, p.2)

***Figura 5.3. Dibujo original del experimento de la pila de arena.***



Fuente: Solé et al (1996, p.311)

**Figura 5.4. Tamaño de las avalanchas y frecuencia de cada una de ellas cuando el sistema (la pila de arena) ha alcanzado la pendiente crítica.**

### 5.3.2. La vida en el borde del caos y la autoorganización en biología

Chris Langton, especialista en vida artificial del Instituto de Santa Fe y Norman Packard, físico de Santa Cruz, realizaron estudios con autómatas celulares encontrando que ciertos *micromundos* existentes en el ordenador evolucionan de manera automática hacia un punto crítico, a medio camino entre el orden y el desorden, en el que la capacidad de procesamiento de información se maximiza.

Langton en su modelo recogerá los trabajos de Stephen Wolfram sobre autómatas celulares en el que propone cuatro clases universales de comportamiento de dichos autómatas. En la Clase I los autómatas celulares acababan extinguiéndose todos y la pantalla del ordenador adquiriría un claro tono monocromático. En la Clase II el comportamiento de los autómatas oscilaba periódicamente por una serie de estados concretos. En la Clase III el comportamiento de los autómatas era totalmente aleatorio, dándose una extrema actividad en la pantalla del ordenador, tan pronto se destruían autómatas como se creaban otros nuevos con absoluta impredecibilidad y dando lugar a una dinámica totalmente inestable, esta clase se correspondería con la dinámica aleatoria. Por

último, en la Clase IV los autómatas mostraban dinámicas también complejas pero ahora estables, donde presentaban estructuras coherentes, estructuras que incluso se combinaban entre sí para generar autómatas más complejos. Es en la Clase IV donde los autómatas celulares optimizan el manejo de la información y donde estos adquieren capacidades emergentes tales como la capacidad de autorreproducción. Langton y Packard pondrán de manifiesto que en dichos autómatas celulares la capacidad para almacenar y procesar información (capacidad computacional) alcanza su valor máximo en un estrecho régimen situado entre el comportamiento periódico y el comportamiento plenamente aleatorio. Langton (1986) llamará a este punto “el arranque del caos” (en inglés *onset of chaos*), Packard (1988) lo denominará “el borde del caos” (*at the edge of chaos*), siendo esta última la expresión que se ha hecho más popular. Podemos considerar el borde del caos como una región intermedia entre el orden absoluto, característico de la mecánica clásica, de la física newtoniana, y el azar completo. El borde, el filo del caos es un estrecho régimen en el que los sistemas mantienen un comportamiento que no cae ni en la repetición permanente ni tampoco se disuelven en la plena turbulencia, Waldrop (1992)

La vida en el borde del caos de Langton y Packard, nos muestra que los sistemas biológicos no pueden existir ni en situaciones continuamente repetitivas y estables ni en la región caracterizada por la plena aleatoriedad. Por un lado, la vida necesita de desequilibrios, de la flexibilidad que proporciona un cierto desorden, pero, por otro, también es necesario cierto orden pues no hay estructura alguna posible en el azar. Un cierto orden se hace necesario para almacenar información, para mantener cierta estabilidad estructural, Langton, (1986); Lewin (1992); Solé et al., (1996).

Esta teoría recibirá diferentes respaldos especialmente por parte del bioquímico y biofísico Stuart Kauffman del Instituto de Santa Fe por sus trabajos con redes booleanas aleatorias y sus hallazgos sobre la autoorganización. Kauffman ha desarrollado un importante trabajo basado en la aparición de orden espontáneo en los sistemas biológicos. Sus trabajos se enmarcan dentro de la biología evolutiva abordando la cuestión desde el enfoque de los sistemas



complejos. Mantiene la hipótesis de que en sistemas (químicos y físicos) con suficiente grado de complejidad emerge un orden espontáneo que puede ser el origen de los sistemas vivos. «Afirmo que la vida es una propiedad, emergente y esperada, de las redes complejas de reacciones químicas.» Kauffman (2000, 2003, p. 64). Para él los sistemas biológicos se auto-construyen a partir de la co-evolución de los agentes que lo forman, jugando la mutación y la selección un importante papel en este proceso.

Aunque es bien cierto que el comportamiento de los sistemas biológicos se basa en aspectos muy diferentes a los que rigen el comportamiento de los sistemas económicos, Kauffman considera, y nosotros le seguiremos, que entre los sistemas biológicos y económicos existen importantes similitudes. Ambos son sistemas formados por muchos agentes en interrelación, caracterizados por una conducta compleja y basados en la interacción entre los agentes que lo forman, tanto los sistemas biológicos como económicos tiene su origen en la obtención de ventajas mutuas. Actualmente el enfoque que Kauffman proporciona de la auto-organización es el que parece haber tenido más aceptación en el campo económico. Como él mismo señala, tanto la biosfera como la “econosfera” son sistemas complejos que se construyen a partir de la co-evolución de sus agentes.

Los planteamientos desarrollados por esta rama de la biología evolutiva son especialmente relevantes para este trabajo por varias cuestiones: en primer lugar, las características de los modelos biológicos parecen mucho más próximas al comportamiento de la economía que los desarrollos procedentes de la física como la criticalidad de Bak o los desarrollos desde la termodinámica. En segundo lugar, más allá de la consideración de las biosferas y “econosferas” como sistemas autoorganizados, Kauffman defiende que en ambas pueden encontrarse ciertas leyes generales que rigen su construcción, afirmando que estos sistemas se dirigen hacia un estado caracterizado por la aparición de leyes potenciales. En tercer lugar, reiteradas veces se nos advierte, explícitamente, de similitudes entre el origen de los procesos de autoorganización en biología y economía.

Desde la biología la autoorganización es un proceso generado por lo que Kauffman (2000,2003, p.13) llama *agentes autónomos*, definidos como: «Todo sistema capaz de actuar en su propio interés en un entorno dado». Todas las células independientes son agentes autónomos<sup>32</sup>, al igual que para nosotros lo serán las empresas, capaces de tomar decisiones en provecho propio, ambas – células y empresas- tienen en común con el resto de agentes autónomos su capacidad para manipular el universo que nos rodea. Los agentes autónomos co-evolucionan y a partir de aquí construyen la biosfera, pero la forma en que los agentes evolucionan difiere, según Kauffman, de los planteamientos darwinianos<sup>33</sup>. Para estos últimos la evolución se basa en una adaptación gradual al medio a partir de la selección natural, sin embargo Kauffman considera esta visión errónea, puesto que la evolución se basa previamente en la aparición de orden espontáneo cuya supervivencia dependerá de su adaptación al medio. La selección natural jugará el papel de retener aquellos órdenes espontáneos más adecuados para el medio. En palabras de Kauffman (2003, p.17): «La moderna teoría evolutiva, basada en el concepto darwiniano de descendencia con variaciones heredables que la selección natural tamiza, reteniendo los cambios adaptativos, acostumbra a ver la selección como única fuente de orden en los organismos. Pero la delicada simetría de un simple copo de nieve sugiere que el orden también puede surgir sin el concurso de la selección natural». « (...) el desarrollo de un recién nacido a partir del óvulo fertilizado, no refleja únicamente la selección. Por el contrario, la mayor parte del orden en los organismos, es, según creo, espontáneo y autoorganizado. La autoorganización se mezcla con la selección natural en formas aún apenas comprendidas para dar lugar a la magnificencia de nuestra desbordante biosfera. Deberemos, pues, extender nuestra teoría evolutiva». «La evolución según Darwin no es capaz de explicar la génesis de las formas, únicamente explica como las formas se transforman una vez han sido generadas», Kauffman (2003, p.39).

---

32. Pero la bacteria es simplemente un sistema físico, para Kauffman la pregunta básica es ¿qué es lo que hace que un sistema físico se convierta en un agente autónomo?

33. Actualmente las principales posturas en biología evolutiva pueden clasificarse en tres grandes tipos: las que defienden que la selección natural es la principal fuerza evolutiva, las que, al contrario, piensan que la autoorganización es la causante de la evolución y, finalmente, las que defienden que ambas son igualmente relevantes.

Este nuevo planteamiento de la evolución que rechaza el gradualismo de Darwin, al considerar que la evolución no puede basarse solo en adaptación, que necesita además de la aparición de orden espontáneo, debe explicar que leyes o reglas determinan el proceso evolutivo, como explica Kauffman (2003, p.40): «La evolución ha debido forjar de alguna manera la propia capacidad evolutiva de las criaturas. El ser vivo va adaptándose al entorno de manera que pervivirán aquellas mutaciones que se adapten bien. De manera que podemos decir que la evolución se alimenta a sí misma».

Las formas de ganarse la vida, también llamadas “juegos naturales”, son encontradas y perfeccionadas por las estrategias de búsqueda evolutiva – mutación y recombinación genética– que practican los organismos biológicos. Éstas constituyen los nichos que las poblaciones en proceso de especiación y diversificación serán capaces de ocupar y dominar de manera que las capacidades que desarrollan las especies y las formas de ganarse la vida, se construyen a la vez. «De algún modo, los organismos, sus nichos y los procedimientos de búsqueda se construyen unos a otros conjunta y autoconsistentemente. Fabricamos un mundo en el que nos ganamos la vida de una forma en que más o menos podamos dominar ese mismo mundo a medida que lo construimos. La misma afirmación es válida, según veremos para una ecosfera.», Kauffman (2000, 2003, p.44).

Los planteamientos de Kauffman tienen como objetivo final demostrar que el origen de la vida hunde sus raíces en la aparición de orden espontáneo que surge a partir del *cierre autocatalítico*, siendo la célula el sistema o agente autónomo representativo. La célula tiene capacidad de reproducción por sí misma, en ésta, todas las moléculas del sistema cuya formación deba ser catalizada encuentran a ese elemento que es su catalizador y por tanto todas las funciones catalíticas se ven satisfechas. La emergencia de estos conjuntos autocatalíticos lejos de ser improbable parece casi segura en reacciones químicas con suficiente diversidad, es por ello que Kauffman mantiene la hipótesis de que la vida es una propiedad emergente de las redes complejas de reacciones

químicas. «A medida que se incremente la diversidad de especies moleculares en un sistema reactivo, se alcanza un umbral más allá del cual la formación de conjuntos de moléculas colectivamente autocatalíticos es casi inevitable.» Kauffman (2003, p.64). Además, declara, explícitamente, que la idea de cierre autocatalítico también es aplicable a la aparición de tejidos económicos, o mercados. Sugiere que el cierre autocatalítico también es el origen de orden espontáneo en la economía.

La célula, un agente autónomo que se muestra como un “todo” organizado, no consiste en un conjunto de moléculas autoreplicándose a sí mismas sino que por el contrario es un conjunto complejo de eventos moleculares mediante el cual la célula genera reproducciones de sí misma. En la práctica una célula contemporánea constituye un todo colectivamente autocatalítico donde el ADN, el ARN, las proteínas y el metabolismo se enlazan y cooperan para catalizar el conjunto de reacciones que permiten que la célula se reproduzca. Ahora, para que este fenómeno se produzca es necesario un mínimo de complejidad, de diversidad molecular que permita generar las reacciones necesarias para la reproducción. Es posible que conforme aumente la diversidad molecular también lo haga la probabilidad de autocatálisis colectiva, Kauffman (2003, p.81). Esta idea puede aproximarse a partir de los descubrimientos observados en los “grafos aleatorios”.

*El modelo de los hilos y los botones.*

El ejemplo de los botones e hilos es conocido formalmente como “grafo aleatorio”, y fue estudiado por primera vez en 1956 por Erdős y Rényi. El modelo parte de un número elevado de botones esparcidos en una superficie. Conectamos dos botones al azar y los unimos con una hebra de hilo. Repetimos este proceso eligiendo aleatoriamente sucesivas parejas de botones, incluidos aquellos botones que ya estén enlazados por un hilo a algún otro botón. Al principio, cuando hemos conectado sólo unos pocos pares, si levantamos un botón es casi seguro que esté aislado y es probable que esté conectado con algún otro. Pero a medida que continuemos uniendo pares de botones, cuando la proporción de hilos a botones se incrementa llegará un momento que se formará

un cierto número de racimos de mediano tamaño. A partir de aquí, cuando cojamos algunos botones más, los racimos se conectarán casualmente formando un racimo gigante, en ese momento se ha producido una transición de fase.

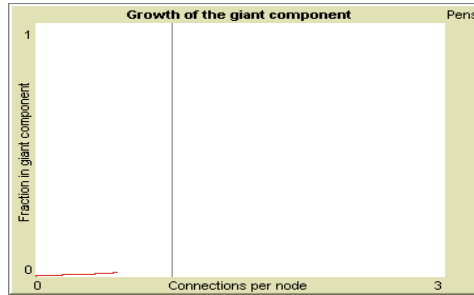
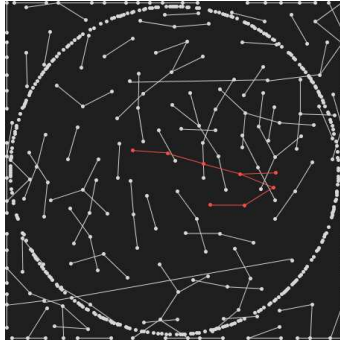
El grafo aleatorio muestra como –entre un conjunto de puntos o vértices conectados por una serie de aristas– se produce una transición de fase cuando los elementos alcanzan un determinado nivel de conectividad. Si aumentamos la conectividad del grafo aleatorio, es decir, la proporción de aristas a vértices, en un determinado nivel que denominamos crítico, se produce un salto a una red altamente conectada. Kauffman considera que esta idea inicial de Erdős y Rényi puede utilizarse para expresar como surge la autocatálisis afirmando que: «la emergencia espontánea de conjuntos de moléculas colectivamente autocatalíticos puede interpretarse como una transición de fase hacia un “componente gigante” análogo al ejemplo de los botones e hilos», Kauffman (2003, p.71).

A medida que aumenta la diversidad de moléculas las reacciones entre ellas crecen en mayor medida. El ejemplo del “componente gigante” nos induce a pensar que la autocatálisis colectiva se hace más probable conforme el número de reacciones posibles para cada especie molecular se eleva, cuando ello ocurre la emergencia de conjuntos autocatalíticos es relativamente sencilla.

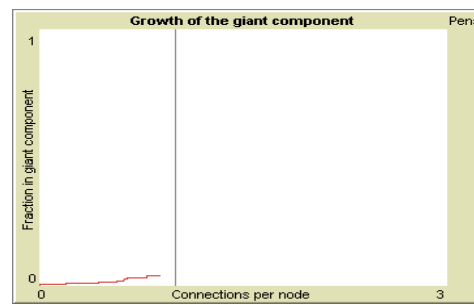
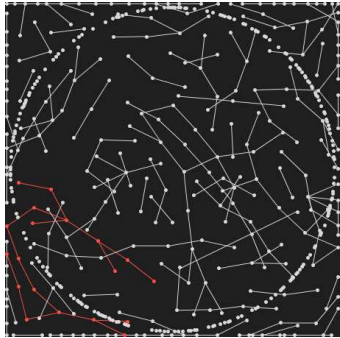
El programa Netlogo, figura 5.5., nos permite visualizar de forma dinámica cuando se produce esa transición de fase. Los nodos interconectados aparecen en color rojo y los aislados en blanco. Inicialmente, a medida que la proporción de aristas (hilos) a nodos (botones) crece, el tamaño del grupo mayor de nodos interconectados crece lentamente –el aspecto de la pantalla no parece cambiar– pero llega un determinado momento en que la pantalla se llena de repente, muy rápidamente, de nodos rojos interconectados, en ese momento se produce la transición de fase, cristalizando el componente gigante.

**Nº de nodos: 500**

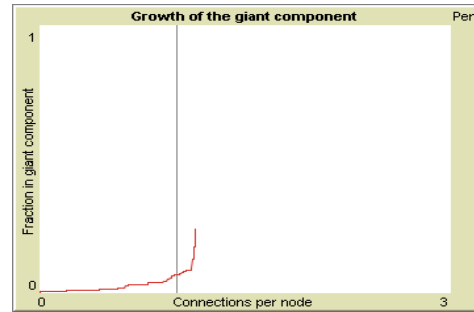
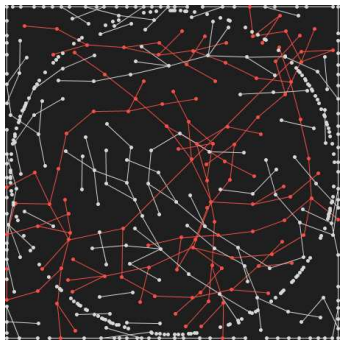
Agregado de mayor tamaño: 8



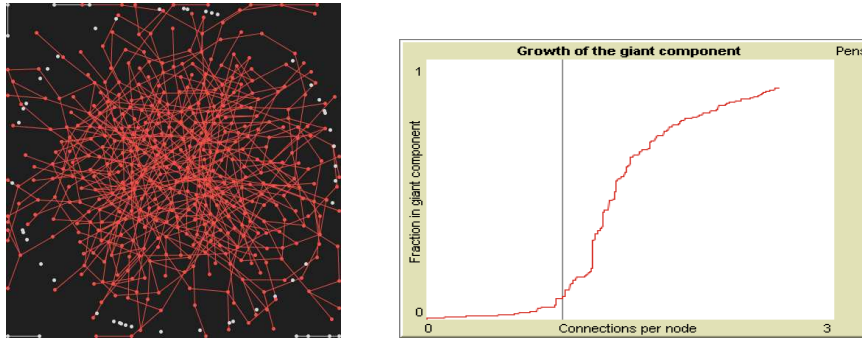
Agregado de mayor tamaño: 19



Agregado de mayor tamaño: 119



Agregado de mayor tamaño: 446



Fuente: Wilensky, U. (2005). *NetLogo Giant Component Model*.  
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/GiantComponent>

**Figura 5.5. Transición de fase en el grafo aleatorio.**

Kauffman (2003, p.87) propone que la idea de cierre autocatalítico parece un buen planteamiento para explicar la emergencia de un tejido económico: «Encuentro fascinante que el sistema industrial británico poseyera una tecnología autocatalítica: hierro y carbón alimentando la fabricación de bombas que favorecían la extracción de más hierro y carbón». Las biosferas y también las “econosferas”, producto de la autocatálisis, se construyen a sí mismas a partir de las interrelaciones que se producen entre los agentes autónomos del sistema. Estos dos grandes sistemas están contruidos por los agentes autónomos que en base a relaciones endergónicas (captan energía del sistema) y exergónicas (expulsan energía hacia el sistema) son capaces de actuar en provecho propio, es decir de asegurar su reproducción. Los procesos a través de los cuales los agentes autónomos (tanto biológicos como económicos) consiguen su reproducción y pervivencia son denominados “juegos naturales” (o formas de ganarse la vida). Estos últimos han co-evolucionado con los propios agentes autónomos, de manera que «los juegos naturales ganadores son los que practican las especies vencedoras» y a su vez estos juegos ganadores son aquellos que pueden ser encontrados por los procedimientos de búsqueda que emplean los propios agentes autónomos co-evolutivos.

Kauffman propone que las líneas estratégicas que dan lugar a la aparición de grandes sistemas biológicos son básicamente las mismas que para las “econosferas”. Mientras que los sistemas biológicos mantienen relaciones endergónicas y exergónicas para asegurar su reproducción, los agentes económicos basan sus relaciones en las ventajas derivadas del intercambio (comercial). Como claramente expresa Kauffman (2003, p. 117): «Transformemos la satisfacción o utilidad económica en “tasa de reproducción” o eficacia biológica y asociemos un aumento del bienestar a un “incremento de la tasa de reproducción” y, por lo tanto, en dicha eficacia. Convirtamos las ventajas del comercio en interacciones mutualistas mediante las cuales dos agentes autónomos consiguen, ambos, reproducirse más rápidamente». Así pues, concluimos que, ambas, biosfera y econosfera tienen en común el hecho de ser autoconstruidas sobre la base de las ventajas del intercambio entre los agentes del sistema

#### *La incapacidad de predeterminar el espacio de configuraciones*

Las econosferas crecen aumentando continuamente la diversidad. Los agentes autónomos, las empresas, están permanentemente empeñados en un proceso de creatividad e innovación -morfológica, organizativa, de comportamiento, etc.- a través de lo *adyacente posible*; definido como el conjunto de objetos o eventos nuevos (o posibilidades de generar riqueza), no construidos aún, que pueden ser obtenidos a partir del conjunto actual de objetos. Pero Kauffman advierte de nuestra incapacidad para predecir el futuro comportamiento de estos grandes sistemas. La física tradicional (en la que incluimos tanto a Newton como a Einstein) supone que nosotros, más o menos, podremos analizar o prever como evolucionara un sistema si tenemos información de todas las variables que participan en él y su posición. Sin embargo, Kauffman (2000, 2003 p. 12) afirma que esto es imposible tanto para grandes sistemas biológicos como económicos, porque no es posible predecir de antemano el *espacio de configuraciones*, pues no está escrito, tanto las especies, su adaptación, como el entorno forman parte de un proceso co-evolutivo. La razón de esta imposibilidad se debe a lo que él denomina “preadaptaciones”, «es decir, las consecuencias causales de ciertas características de un organismo carentes de significado



adaptativo en el entorno habitual en el que dicho organismo se desenvuelve, pero que pueden cobrar importancia en un entorno nuevo y ser finalmente escogidas por la selección natural. De esta manera surgieron el oído, los pulmones, y la capacidad de vuelo». De igual forma, bajo los planteamientos de Kauffman, es imposible predecir como será la “econoesfera” en el futuro, puesto que no es posible predefinir las posibilidades de nuevos negocios que pueden surgir. La capacidad empresarial, los tipos de empresas y las posibilidades que proporciona el entorno se co-construyen. No somos capaces de prever que negocios serán posibles mañana porque estos surgen de cambios organizativos, de nuevos métodos que los agentes autónomos –empresas en este caso– están continuamente desarrollando, y cada cambio o nuevo desarrollo de un agente está modificando el paisaje adaptativo, provocando a su vez nuevos cambios y desarrollos en otros agentes deformándolo continuamente. Los nichos no surgen y las empresas los alcanzan sino que es el desarrollo empresarial y tecnológico el que crea las posibilidades de que en la economía aparezcan nuevos nichos. En palabras de Kauffman (2003, p.12): «La biosfera, en su evolución permanente, está efectuando algo literalmente incalculable, no algorítmico, y fuera de nuestra capacidad de predicción. Y ello no es debido sólo a la incertidumbre cuántica o al caos determinista, sino a una razón diferente e igual de profunda: la emergencia y la persistente creatividad de la que está dotado el universo físico».

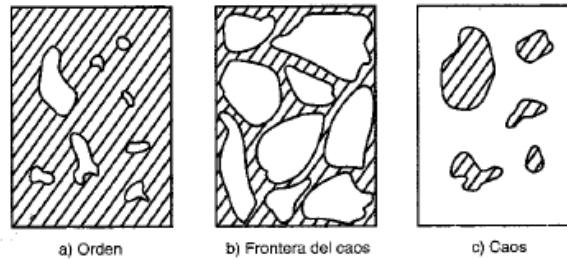
#### *Leyes que rigen la construcción de grandes sistemas*

Kauffman plantea la hipótesis de la existencia de ciertas leyes en el comportamiento de sistemas como las biosferas y econoesferas. Considera que las comunidades de agentes autónomos evolucionarán hacia una “frontera del caos” caracterizada por la aparición de leyes potenciales, concretamente en las avalanchas de especiación, extinción y también en la edad de los agentes. Para su explicación utiliza un modelo de redes genéticas booleanas, concluyendo que las redes pueden residir en tres regímenes básicos de comportamiento: ordenado, caótico y próximo a la transición de fase entre el orden y el caos. En su modelo, el régimen en el que acabará residiendo la red dependerá de ciertas propiedades,

entre las que se encuentran la conectividad de la red y un simple sesgo en las funciones booleanas, Kauffman (2003, pp. 224-29).

Supongamos un sistema formado por N cantidad de agentes situados en un plano, cada uno de los agentes puede estar potencialmente conectado con ciertos agentes (vecinos) de la red, de manera que si se activa o modifica la situación de un agente provocará efecto sobre otros elementos del sistema, generando avalanchas de cambio. La existencia de leyes potenciales en dichas avalanchas apunta a que en el sistema debe existir algún tipo de orden que podría visualmente aproximarse a la existencia de racimos de elementos interconectados que están separados unos de otros y que además responden a una ley potencial. El tamaño del racimo condiciona el tamaño de las avalanchas de extinción. Si por el contrario el sistema estuviese conectado como un todo se producirían demasiadas avalanchas masivas y el sistema sería altamente inestable.

En la figura 5.6. los agentes –genes binarios– en el modelo de Kauffman, se suponen dispuestos en forma de cuadrícula bidimensional, de modo que cada uno recibe entradas de sus cuatro vecinos. Imaginamos los genes de color “x” como aquellos que están parpadeando continuamente (se activan y desactivan, cambian) y de color “y” los genes congelados en un estadio, ya sea activo o inactivo. En el régimen ordenado la cuadrícula muestra un mar de color “y” que se extiende por toda la red. En el régimen caótico la red estaría inundada de un mar parpadeante de color “x”. En la transición de fase, en la frontera del caos, el mar de color “x” empieza a fraccionarse en islas de todos los tamaños. «La intuición nos dice que el comportamiento más complejo y coordinado tiene lugar en las redes que se hallan en el régimen ordenado, cerca de la frontera del caos.» Kauffman (2003, p.230).



Fuente: Kauffman (2003, p.230)

***Figura.5.6. Representación esquemática de los regímenes ordenado, en la frontera del caos y caótico para las redes booleanas.***

Aunque Kauffman relaciona directamente la autoorganización con la existencia de leyes potenciales y es más con la frontera del caos, lo que supone un paso importante para afianzar la conexión entre leyes potenciales y autoorganización, aún nos faltan muchas piezas para poder comprender los mecanismos subyacentes que dan lugar a la aparición de este tipo de leyes, por lo menos en economía. Otra de las áreas que también trata la cuestión que nos ocupa y que analizaremos a continuación es la teoría de redes, que recientemente ha hecho interesantes descubrimientos sobre la aparición de redes que se autoorganizan de forma espontánea y que tienen relación con las leyes potenciales.

### ***5.3.3. Redes emergentes***

Tradicionalmente, las redes de topología compleja han sido descritas utilizando la teoría de los grafos aleatorios de Erdős y Rényi. Hasta momentos recientes la ausencia de datos de grandes redes reales hacía que las predicciones de esta teoría raramente fueran contrastadas para el mundo real. En el modelo de redes de Erdős y Rényi (1960)<sup>34</sup> la red está formada por un conjunto de nodos determinados en el momento inicial. En sucesivos momentos del tiempo, un nuevo nodo se enlaza con otro de los nodos de la red que puede estar o no estar

---

34. También en Bollobás, B. (1985):*Random Graphs*, Academic Press, London

ya conectado. El desarrollo de la informática, tanto por las nuevas metodologías que proporciona como por permitir el acceso a grandes fuentes de datos, ha hecho posible que conozcamos mucho más acerca de la estructura de grandes redes en el mundo real, observando que la estructura de éstas no coincide con la distribución aleatoria de enlaces prevista por el modelo anterior.

Actualmente, la evidencia empírica y los resultados teóricos indican que si nos basamos en la distribución de la conectividad, las redes complejas pueden dividirse en dos grandes tipos: las redes exponenciales y las redes libres de escala. En la primera clase, la distribución de probabilidad de la cantidad de enlaces por nodos,  $P(k)$ , alcanza una media y a partir de ésta, a medida que aumentamos el número de enlaces,  $k$ , la probabilidad decrece exponencialmente. Los ejemplos más investigados de redes exponenciales son el *grafo aleatorio* de Erdős y Rényi (1960) y el *small-world* de Watts y Strogatz (1998) ambos generan redes bastante homogéneas donde cada nodo tiene aproximadamente el mismo número de enlaces. Sin embargo, los estudios realizados sobre la estructura de la World Wide Web, Internet, y otras grandes redes nos indican que muchas de ellas presentan una estructura que está muy lejos de ser homogénea. En esta segunda clase de redes, llamadas *libres de escala*, la distribución de probabilidad de los enlaces entre los diversos nodos de la red responde a una ley potencial, existen unos pocos nodos que están altamente conectados con un número muy elevado de enlaces frente a gran cantidad de nodos con un número reducido de enlaces.

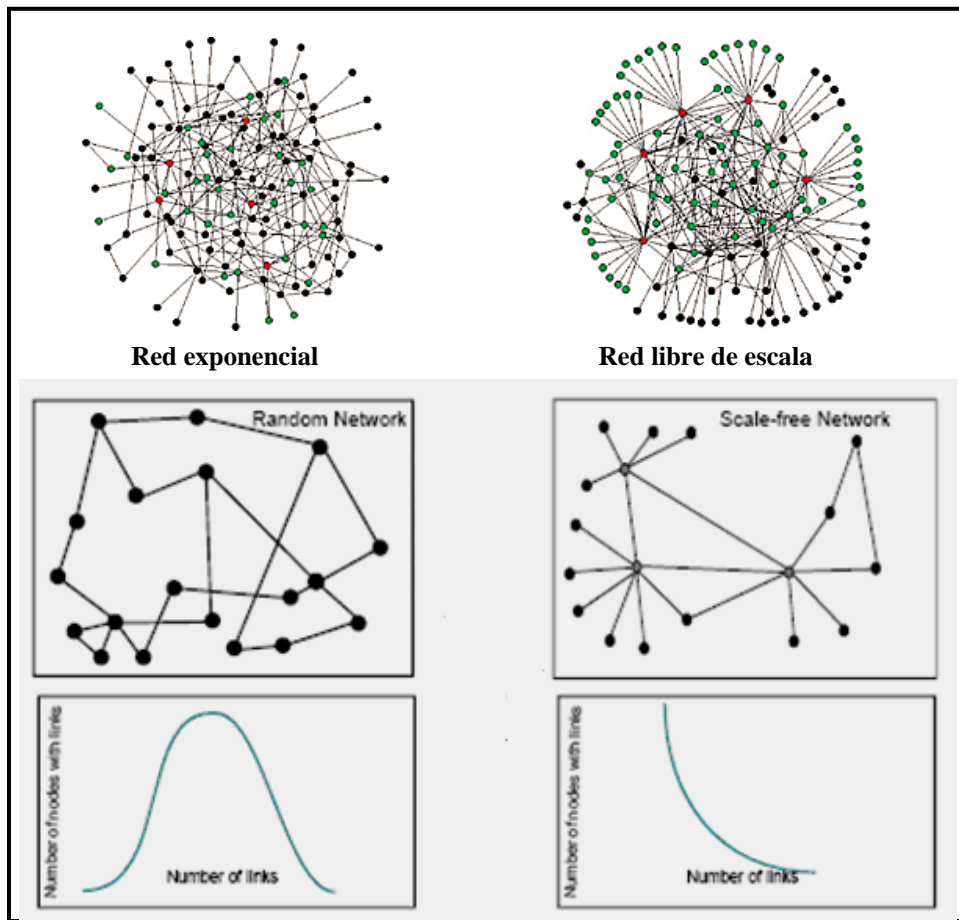
Como se observa en la figura 5.7., en el caso de la red exponencial el pico de la curva de campana nos da la escala de la red. Sin embargo, en el caso las redes libres de escala no existe un número de enlaces representativo. En este último caso, la frecuencia de aparición de un nodo, con un determinado nivel de conectividad, depende inversamente de dicho grado de conectividad. Es decir, existe una relación inversa entre el número de enlaces por nodo y la frecuencia de aparición.

Barabasi y Albert (1999) describen como sistemas muy diversos, entre los que se incluyen las redes genéticas o la World Wide Web, no pueden ser bien descritos por el modelo de grafos aleatorios de Erdős y Rényi (1960). Estos sistemas se ajustan a redes de topología compleja en los que se demuestra la existencia de una distribución potencial en la conectividad de los nodos. Los autores plantean que este rasgo de las redes complejas es consecuencia de la conjunción de dos mecanismos genéricos: en primer lugar, las redes se expanden continuamente por la adición de nuevos nodos y en segundo lugar, los nuevos vértices se enlazan preferentemente con los lugares ya bien conectados. Un modelo basado en estos dos ingredientes reproduce distribuciones (estacionarias) libres de escala como las observadas, indicándonos que el desarrollo de las grandes redes es gobernado por un robusto fenómeno de autoorganización entre los elementos particulares de la red.

Para Barabasi y Albert (1999) el sistema nervioso es un buen ejemplo de grandes redes autoorganizadas. Forma una gran red organizacional cuyos vértices son las células nerviosas conectadas por axones. De forma similar, también aparecen redes complejas en las ciencias sociales, en estos casos los vértices o nodos son los individuos u organizaciones y los enlaces caracterizan las interacciones sociales entre ellos. En la World Wide Web los vértices corresponden a los documentos Html, conectados por links, que nos dirigen de unas páginas a otras. En estos casos, la topología de la red es ampliamente desconocida debido a su gran tamaño y a la complejidad de las interacciones.

Barabasi y Albert (1999) aseguran que muchas de las grandes redes reales se caracterizan por poseer un alto grado de autoorganización. Con independencia de las características del propio sistema y de la identidad de los constituyentes que la forman, su topología se ajusta a las distribuciones de ley potencial. Siendo  $P(k)$  la probabilidad de que un vértice en la red interaccione con otros, se observa que la probabilidad decae en relación al tamaño del nodo (medido por su número de enlaces), concretamente la distribución se ajusta a una ley potencial tal que  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ . Y, como este comportamiento surge de forma espontánea, los autores

han planteado como hipótesis que las grandes redes se autoorganizan en redes libres de escala.



Fuente: [www.questinstitute.co.uk/dynamic/resources/Regression\\_and\\_Barabasi.pdf](http://www.questinstitute.co.uk/dynamic/resources/Regression_and_Barabasi.pdf)

**Figura 5.7. Redes aleatorias: redes exponenciales y redes libres de escala.**

El modelo de redes de Barabasi y Albert presenta varias ventajas frente al modelo ER de redes aleatorias. En primer lugar, los modelos ER suponen que comenzamos con un número  $N$  de vértices que son aleatoriamente conectados sin

que  $N$  se modifique a lo largo del tiempo. Esta premisa es un inconveniente pues la mayor parte de las redes reales son abiertas, se forman a medida que se produce la adición de nuevos vértices a la red, las redes reales generalmente crecen a lo largo de toda su vida. Un conocido ejemplo de red social es la red de actores, que está en continuo crecimiento por la adición de nuevos actores al sistema, al igual que ocurre con el número de páginas web en la *www*, o el número de empresas en los mercados.

Los modelos de redes aleatorias suponen que la probabilidad de que dos vértices sean conectados es aleatoria y uniforme, en contraste con la mayoría de las redes reales que presentan *conectividad preferencial*. Por ejemplo, en el caso de la red de actores la probabilidad de que un nuevo actor trabaje con otro actor ya consagrado o establecido es mucho más alta que la de trabajar con actores menos conocidos. De forma similar, cuando se crea una nueva página web es mucho más probable que introduzca links bien conocidos, es decir, documentos populares que ya posean alta conectividad; también en una nueva publicación científica es más probable que se citen trabajos ya conocidos. En todos estos ejemplos, la probabilidad de que un nodo sea elegido como enlace de otro que acaba de incorporarse a la red no es uniforme, existe alta probabilidad de que se enlacen a un nodo que ya tiene un importante número de conexiones.

En resumen, Barabasi y Albert (1999) crean un modelo donde la conectividad de la red presenta una estructura de ley potencial, ésta estructura surge si consideramos dos supuestos en la formación de redes: enlace preferencial, los nodos más conectados serán los que capten más nuevos enlaces y crecimiento continuo de los agentes participantes en el sistema. Sugieren que la presencia de leyes libres de escala en el mundo real se debe a las ventajas que presentan este tipo de redes frente a las redes más homogéneas. Estas últimas son mucho más vulnerables a ataques aleatorios que las redes libres de escala. Si suponemos que por alguna razón los nodos de una red son atacados, a medida que el ataque vaya afectado cada vez a un mayor número de nodos, necesitaremos más tiempo para pasar de un punto a otro de la red. En las redes libres de

escala el ataque aleatorio a varios de sus nodos no afecta tanto a la conexión de los elementos de la red como en el caso de las exponenciales, en las que se pueden cambiar los caminos pero no el número de pasos. En el caso de las redes libres de escala, es muy probable que el ataque a algunos nodos no provoque un aumento en los tiempos de interconexión, sin embargo, como contrapartida, si se ven atacados los nodos con alto nivel de conectividad, el efecto es catastrófico.

Los supuestos planteados por Barabasi y Albert (1999): en primer lugar crecimiento continuo en el número de nodos, y en segundo lugar una mayor probabilidad de enlace con aquellos nodos que están mejor interconectados, provoca que los nodos mejor conectados tiendan a estar cada vez más conectados, o con otras palabras que “el rico se enriquezca”. Existen bastantes similitudes entre los planteamientos de Barabasi y Albert, y los desarrollados por Gibrat (1931) y especialmente Simon (1955, 1958).

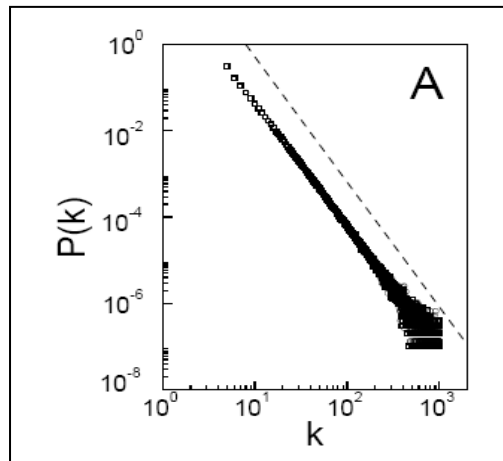
Albert et al (2000) profundizan en el estudio de las redes libres de escala destacando las siguientes características:

1. La estructura, topología de la red, es muy robusta. El sistema es capaz de mantener su estructura ante “ataques” aleatorios sobre diferentes nodos o elementos de la red. En la red hay una alta proporción de nodos que mantienen pocos enlaces frente a pocos nodos con gran cantidad de ellos, estos nodos son los que mantienen la conexión en la red. La probabilidad de que sean atacados nodos con pocos enlaces es mucho más probable de manera que la conectividad de la red no se ve fácilmente alterada. Esta es la explicación de la robustez observada en este tipo de redes.
2. Por el contrario, este tipo de redes son muy vulnerables a “ataques selectivos” si los ataques se producen en un nodo de gran cantidad de enlaces se producirían efectos catastróficos.
3. Las características descritas por Barabasi y Albert parecen tener ciertas similitudes o coincidencias con la criticidad autoorganizada de Bak.



Recordamos que, según éste, ciertos sistemas complejos tienden hacia un estado crítico caracterizados por una distribución en el tamaño de las avalanchas que sigue una ley potencial. Cuando el sistema es perturbado pueden producirse reacciones que impliquen pocos elementos del sistema o que tengan efectos de gran magnitud. Ahora, estos últimos serán poco frecuentes.

4. Una característica observada también por los investigadores es la “mejor” conectividad que presentan las redes libres de escala en comparación con las redes exponenciales. La cantidad de enlaces que se necesitan como término medio para conectar dos nodos cualesquiera de la red es mucho menor en las redes libres de escala que en las redes aleatorias.



Fuente: Barabasi y Albert (1999, p.512)

***Figura 5.8. Distribución de ley potencial para la conectividad de la red (World Wide Web).***

La última característica es especialmente relevante pues muestra que la estructura emergente del proceso de autoorganización es más eficiente en la transmisión de información que otros tipos de estructura. En conclusión, dos ventajas se atribuyen a las redes libres de escala: robustez ante perturbaciones y la eficiencia en la conectividad.



## **PARTE III.**

# **LA EMERGENCIA DE ORDEN EN SISTEMAS COMPLEJOS.**

---



## **CAPÍTULO 6**

### **SISTEMAS AUTOORGANIZADOS**

#### **6.1. INTRODUCCIÓN AL PENSAMIENTO DESCENTRALIZADO**

La creencia en sistemas que se autoorganizaban existía desde bastante tiempo atrás pero a partir de ideas muy dispersas. «Sin duda, algunas de las grandes mentes de los últimos siglos –Adam Smith, Friedrich Engels, Charles Darwin, Alan Turing– contribuyeron a la desconocida ciencia de la autoorganización, pero como aún no era un campo de estudio reconocido, sus obras fueron archivadas de acuerdo a materias convencionales», Johnson (2003, p.18). Tiempo más tarde se tomó conciencia de que muchos de los fenómenos que habían sido estudiados de forma aislada respondían a un mismo tipo de comportamiento. Keller y Segel lo observaron en la formación de colonias del moho de fango; Jane Jacobs en la formación de barrios urbanos; O.Wilson en el comportamiento de las colonias de hormigas y Marvin Minsky en el estudio de las diferentes redes del cerebro humano. Estos sistemas comparten la característica de ser *sistemas ascendentes* “*de abajo a arriba*”, resuelven sus problemas recurriendo a masas de elementos –relativamente inteligentes- en lugar de hacerlo recurriendo a un solo “brazo ejecutor” inteligente como ocurre en los *sistemas descendentes*.

Desde los inicios, uno de los ejemplos más utilizados para hablar de sistemas autoorganizados han sido las bandadas de pájaros. Todos hemos observado que, en ellas, el movimiento es ordenado y sincronizado. Muchas personas piensan que los pájaros siguen una especie de juego basado en seguir al líder; el pájaro que está delante dirige la bandada y los otros le siguen. Actualmente sabemos que eso no es así, la mayoría de las bandadas de pájaros no

tienen líder. El movimiento sincronizado y las formas que vamos observando en dichas bandadas son derivados de un proceso de autoorganización. Cada pájaro en el grupo sigue unas reglas simples reaccionando a los movimientos de los pájaros que tiene próximos, ninguno de los pájaros tiene conocimiento de la pauta global de la bandada, no conoce la existencia de la bandada como un todo; las pautas globales surgen de repente derivadas de las pautas de estas reglas simples e interacciones locales. El pájaro de delante no es líder en ninguno de los sentidos. La bandada se organiza sin un organizador, se coordina sin un coordinador.

El ejemplo anterior no es el único sobre comportamientos de estas características. Las colonias de hormigas, el tráfico, las economías de mercado, los sistemas inmunológicos, y los asentamientos de la población son conductas que no están determinadas por una autoridad central, dichas conductas vienen determinadas por las interacciones locales entre componentes descentralizados. Por ejemplo, en el caso de las colonias de hormigas, las pautas como recolección de alimento o exploración de otros territorios, no son pautas determinadas por los dictados de la hormiga reina sino por las interacciones locales entre miles de hormigas trabajadoras; las pautas del tráfico surgen a partir de las interacciones locales entre automóviles individuales; y las pautas o conductas macroeconómicas surgen de interacciones locales entre millones de compradores y vendedores.

Como afirma Resnick (1997, p.4), en los últimos años se ha producido una creciente fascinación por este tipo de sistemas. Las ideas sobre descentralización y autoorganización, se han propagado por la cultura como un virus, infectando todos los dominios de la vida. De forma creciente, la gente esta eligiendo modelos descentralizados para las organizaciones y tecnologías que pueden construirse en el mundo. Pero, como contrapartida, a medida que la influencia de las ideas de descentralización ha ido creciendo, también se ha producido una profunda resistencia a este tipo de ideas.

Resnick (1997, p.4) advierte que las personas solemos tener fuertes ataduras con una forma de pensar “centralista”. Cuando la gente ve pautas en el

mundo real como en el caso de las bandadas de pájaros, asumen que debe existir algún tipo de control centralizado (un líder de la bandada). De acuerdo con este tipo de pensamiento, las pautas o conductas solo pueden existir si alguien, o algo, crea, u orquesta, la conducta. Todo tiene que tener una causa última, un último factor controlador. Hasta hace poco tiempo, incluso los científicos pensaban que las bandadas deberían tener líder, y sólo recientemente han revisado sus teorías en diversas ramas de la ciencia.

Por supuesto el interés por la descentralización en economía no es nuevo, hace más de 200 años, Adam Smith realizó una fuerte argumentación en contra de un control gubernamental centralizado de la economía. En *La Riqueza de las Naciones* publicada en 1776, Smith aportaba la idea de que los mercados descentralizados son una alternativa más ordenada y eficiente que la alternativa del control centralizado. Su metáfora de “una mano invisible” sirvió para aproximarnos a la idea tan radical de que el orden económico y la justicia pueden ser alcanzados -y de hecho así ha sido en muchos casos- sin un control centralizado. Cerca de un siglo más tarde que Adam Smith, Charles Darwin aplicó la idea de la mano invisible a la biología. El reto de Darwin era explicar la organización compleja de los sistemas vivos. Cualquiera de las criaturas más simples del mundo real es más compleja que la máquinas más complejas del mundo tecnológico, Resnick (1997, p.7). Darwin, en *El Origen de las Especies*, propuso la primera alternativa seria a la idea de un orden de carácter centralizado: su teoría de la selección natural. Antes de él, casi todo el mundo aceptaba la idea de explicaciones centralizadas: Dios diseñó la complejidad de las criaturas. Al igual que Adam Smith afirmó que para crear orden en la economía no necesitaba un control gubernamental centralizado, Darwin sostuvo que para crear orden en el mundo de los vivos no es necesario un diseñador central, el orden y la complejidad surgen de procesos descentralizados de variación y selección.

Si bien el interés por la descentralización no es un fenómeno nuevo, hoy en día existen diferencias con periodos precedentes. Las ideas sobre descentraliza-



ción se difunden más rápidamente y la descentralización aparece como un tema relativamente habitual en muchos dominios de la actividad humana.

Para Resnick (1997, p.7) podemos afirmar que estamos asistiendo a un cambio revolucionario, que Thomas Kuhn llamaría “un cambio de paradigma”, en la forma en que vemos como se construye el mundo. Desde hace trescientos años, los modelos y metáforas de la física newtoniana han dominado el mundo de la ciencia, han ofrecido la imagen de un universo que funciona como un mecanismo de reloj. El universo de Newton se rige por relaciones lineales causa-efecto, un engranaje gira y hace girar a otro engranaje, que a su vez también hace girar a otro y así sucesivamente. En la percepción mecanicista la idea de “interacción mutua” se desenfatisa. En el universo mecanicista cuando se introducen interacciones siempre se trata de un único objeto interaccionando con otro. Uno de los objetos actúa como causa y el otro sufre el efecto. Si un objeto (la causa) es controlado el otro es el resultado de ese control. Como ya se ha relatado en el capítulo 4, durante el siglo XX la visión newtoniana del mundo ha sido cuestionada por diversos campos, especialmente aquellos que se agrupan en las Ciencias de la Complejidad. Los científicos de diferentes campos han comenzado mirar las cosas menos como mecanismos de reloj y más como ecosistemas complejos. Lejos de mirar el mundo en términos de un objeto individual actuando sobre otro en una clara cadena causal, los investigadores han comenzado a ver el mundo en términos de interacciones descentralizadas y circuitos de retroalimentación. Han estudiado como las conductas complejas pueden surgir de las interacciones entre reglas o leyes simples, y como los caminos o pautas complejas pueden emerger de las interacciones entre componentes simples.

## **6.2. ALGUNOS EJEMPLOS DE SISTEMAS AUTOORGANIZADOS**

### ***6.2.1. Sistemas de autoorganización en seres vivos***

El estudio de las hormigas, parece ser un campo científico bastante estrecho y especializado, aunque, recientemente, un número creciente de

investigadores procedentes de campos distintos a dicha comunidad han comenzado a interesarse en el estudio del comportamiento de las hormigas. De acuerdo con Holstadter (1979) el estudio de las colonias de hormigas puede servir de metáfora para aquellos sistemas en que el todo (la colonia) exhibe una conducta más sofisticada, y de carácter muy distinto, que la conducta de los componentes individuales (las hormigas).

Muchas personas, y no sólo los investigadores, se sienten intrigados con la naturaleza colectiva de la conducta de las hormigas. Aunque el comportamiento de cada hormiga individual es bastante simple, la colonia –como un todo– es capaz de una conducta mucho más sofisticada. Las colonias de hormigas han llegado a ser vistas como un ejemplo prototipo de cómo la conducta de grupos complejos puede surgir de una simple conducta individual. De tal forma que mucha gente ve en la relación colonia/hormiga un modelo iluminador –o una inspiradora metáfora– para pensar en las relaciones individuo/grupo del tipo: una célula y sus moléculas, una empresa y sus empleados, o un país y sus ciudadanos. «*We can experiment on these (ant) societies in a way impossible in any other kind of collective decision-making organization*», Deneubourg y Goss (1989).

En las colonias el abastecimiento de comida se organiza en función de su tamaño, existe una regulación permanentemente del número de hormigas que buscan comida. Esta regulación se basa en cierta cantidad de variables: el tamaño total de la colonia, la cantidad de comida almacenada, la cantidad de comida disponible en los alrededores, incluso la presencia de otras colonias vecinas. Ninguna hormiga individual es capaz de estimar alguna de las variables por sí sola. El mundo perceptivo de la hormiga, en otros términos, se limita al nivel de la calle. No hay una visión de área en la colonia, no hay modo de percibir el sistema en su totalidad. “Ver la totalidad” es tanto una imposibilidad tanto perceptiva como conceptual para cualquier miembro de la especie de las hormigas, en este tipo de sistemas la inteligencia colectiva desempeña un papel esencial. El conjunto de hormigas –donde cada hormiga está limitada a un

reducido vocabulario de feromonas<sup>35</sup> y de habilidades cognitivas mínimas– se encarga de resolver colectivamente problemas que requieren sutileza e improvisación. En respuesta a los cambios en las condiciones externas, las hormigas obreras cambian de tarea entre la construcción del hormiguero, la provisión de comida o el cuidado de las crisálidas. Su pericia para la ingeniería y para la coordinación social es muy inquietante; sobre todo, porque ninguna hormiga individual está “a cargo” de la operación completa.

Las colonias de hormigas, si las comparamos con otros sistemas colectivos, tienen la ventaja de ser más fáciles de estudiar. A diferencia de las moléculas en las células, las hormigas trabajadoras son fácilmente visibles, y podemos manipular las sociedades de insectos y colocarlas, con relativa facilidad, en situaciones experimentales controladas.

Otro de los ejemplos más conocidos de autoorganización en el campo de la biología es el estudio del comportamiento del “moho de fango”. En 1968 los investigadores Keller y Segel se encargan del estudio de este ser, su trabajo tendrá una importante trascendencia en el estudio de sistemas autoorganizados. El moho de fango pasa buena parte de su vida como miles de organismos unicelulares distintos, cada uno de ellos moviéndose de forma independientemente respecto a sus otros compañeros, pero bajo ciertas condiciones se produce la coalescencia de las células en un solo organismo mayor. Cuando la comida es abundante las células del moho de fango existen de forma independiente, se mueven en el entorno y se reproducen simplemente dividiéndose en dos. Cuando la comida comienza a ser escasa la conducta del moho de fango cambia dramáticamente: las células dejan de reproducirse y se

---

35. La comunicación entre las obreras en las colonias de hormigas de fuego fue muy estudiada por Wilson a comienzos de los años sesenta, consiste en un vocabulario de 10 signos, nueve de los cuales se basan en feromonas, la única excepción es la comunicación táctil entre hormigas. Entre otras cosas estas sustancias codifican el reconocimiento de tareas (“estoy en tareas de recolección de alimentos”); la atracción de rastro (“por aquí hay comida”) o conducta de alarma (“huid”). Aunque el vocabulario es simple, las hormigas pueden distinguir gradientes en las feromonas y saber hacia dónde se vuelve más intenso el olor. Los gradientes en el rastro de feromonas son la diferencia entre decir “por aquí cerca debe haber comida” y “hay comida hacia el norte”. Las hormigas estudiadas están adaptadas a medir la frecuencia en que aparece un determinado rastro de feromonas, perciben la diferencia entre encontrar diez o cien hormigas recolectoras

mueven unas hacia otras formando un cluster de decenas de miles de células, en ese momento las células de moho de fango comienzan a actuar como un todo unificado. Lejos de comportarse como una gran criatura unicelular, ellas actúan como una criatura singular multicelular, cambian de forma y comienzan a arrastrarse en busca de un entorno más favorable. Cuando encuentran un sitio que les es adecuado, se diferencian y se desagregan esparciéndose en esporas. Estas esporas colonizan el nuevo entorno comenzando un nuevo ciclo.

Hasta que Keller comenzó sus investigaciones se creyó que las colonias del moho de fango se formaban por el mando que ejercían ciertas células llamadas “marcapasos” que ordenaban a las otras células comenzar dicho proceso de agregación. Durante varios años de búsqueda nadie lograba encontrar a los marcapasos, todas las células del moho de fango eran iguales, los microbiólogos creyeron que la ausencia de células marcapasos se debía a una insuficiencia en los datos o bien a experimentos defectuosos. Pero Keller y Segel hicieron una aproximación distinta inspirados en el trabajo de Turing sobre morfogénesis, consideraron que éste podía ser aplicable a la agregación de células libres de manera que establecieron la hipótesis de que la comunidad de células del moho de fango se organizaban sin marcapasos, cuando las condiciones del entorno se alteraban. La agregación se producía a partir de interacciones locales entre las células.

A pesar de los descubrimientos de Keller y Segel, la hipótesis del “marcapasos” continuaría como modelo dominante durante la década siguiente, hasta que una serie de experimentos probaron que las células del moho de fango se organizaban desde abajo –a partir de la agregación de células indistintas entre ellas–. Treinta años después de que los dos investigadores definieran su teoría, la agregación del moho de fango es reconocida como un caso clásico para el estudio de la *conducta ascendente o botton-up*. El programa Netlogo<sup>36</sup> permite explorar la conducta de este tipo de sistemas descentralizados a partir de la creación de un modelo por ordenador con células artificiales, actualmente dicho modelo es utilizado para explorar conceptos e ideas relacionadas con la aparición de orden espontáneo en sistemas descentralizados.

---

36.<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Slime>.

### 6.2.2. Sistemas de información

En los años 50, en los laboratorios del MIT, el investigador Oliver Selfridge experimentaba con un modelo para enseñar a la computadora a aprender, el planteamiento de Selfridge era novedoso pues se basaba en la idea de una inteligencia ascendente, distribuida y no unificada de forma descendente. En lugar de construir un solo programa inteligente, Selfridge creó un enjambre de programas limitados, a los que llamó demonios. El sistema está formado por 26 demonios cada uno de los cuales es entrenado para reconocer una letra<sup>37</sup>. Los demonios ven una serie de palabras y deben informar favorablemente o desfavorablemente sobre el reconocimiento de las distintas letras. Todos los demonios reconocedores de letras darían cuentas a un demonio superior que haría el recuento de votos para cada letra y elegiría al demonio más seguro. Para enseñar a una máquina el reconocimiento de letras y sonidos, tuvo que añadir otro nivel inferior de demonios y un mecanismo de retroalimentación, a través del cual se calificarían las apuestas de cada demonio. Este nivel inferior estaba compuesto de mini programas todavía menos sofisticados, entrenados sólo para reconocer ciertos rasgos físicos, algunos demonios reconocían rectas paralelas; otros perpendiculares, algunos buscaban círculos y otros puntos. Ninguno de estos rasgos estaba asociado a una letra en particular, estos demonios del nivel inferior no percibían letras o palabras sino puntos, líneas, círculos, etc. La idea clave es que demonios con un mínimo de datos podían ser entrenados para reconocer letras sin saber con anticipación nada del alfabeto. Determinados demonios del nivel inferior reconocerían haber encontrado bien líneas o círculos, estos reconocimientos pasarían a un nivel superior donde determinados demonios analizarán la información de los demonios del nivel inferior, decidiendo que tipo de letra podría adaptarse a esa información. Al principio, los resultados son erráticos; pero si se repite el proceso mil o diez mil veces el sistema aprende a asociar grupos específicos de reconocedores de formas con letras específicas, y pronto el sistema será capaz de reconocer oraciones enteras. El sistema no tiene concepciones predefinidas acerca de la forma de las letras: se le entrena para asociar letras con formas específicas en la fase de clasificación. Este sistema, con

---

37. Las 26 letras del alfabeto inglés.

su aprendizaje ascendente y sus procesos de retroalimentación aparece en la historia como la primera descripción práctica de un programa de software emergente.

Aunque evidentemente existen similitudes en el funcionamiento de sistemas como colonias de hormigas, ciudades o los mercados, Johnson (2003) advierte sobre las limitaciones que existen a la hora de aplicar descubrimientos como los anteriores al comportamiento de las ciudades o también al funcionamiento de los mercados. Existe una diferencia fundamental entre los ejemplos anteriores (las hormigas o el moho de fango) y los sistemas complejos como las empresas, las ciudades o los mercados. Estos tres últimos sistemas, a diferencia de los primeros, están formados por agentes con capacidad para tomar decisiones y con consciencia de que su conducta puede afectar a las decisiones de otros agentes. Es más en el caso de agentes económicos como las empresas, son capaces de diseñar estrategias que les permitan una mejor adaptación al entorno y por tanto mayores éxitos empresariales, que a su vez conducirán a la modificación de estrategias de otras empresas afectadas. El hecho de que los sistemas estén formados por agentes simples -como las colonias de hormigas- es una ventaja, no un inconveniente, para comprender la emergencia de orden en el sistema. Si los agentes son más complejos, como es el caso de las ciudades o el mercado, la autoorganización del sistema será más complicada y por lo tanto más difícil la identificación de reglas para comprender su funcionamiento.

### ***6.2.3. La conducta social***

En el año 1961 La activista y crítica urbana Jane Jacobs publicó su obra *The Death and Life of the Great American Cities*. En el último capítulo del libro Jacobs afirma que comprender el funcionamiento de una ciudad requiere una aproximación del problema desde el nivel de la calle hacia arriba. «En partes de las ciudades que funcionan bien en algunos aspectos y mal en otros (como suele ser el caso), no pueden analizarse las virtudes y los errores, diagnosticar los problemas o considerar cambios beneficiosos sin abordarlos como problemas de complejidad organizada.». «Podremos desear análisis más simplistas y globales,

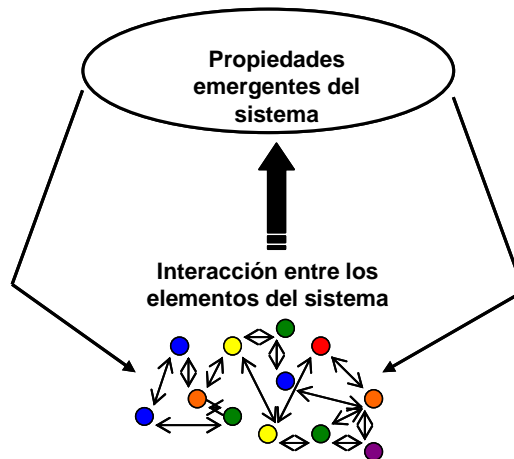
y curas más simples y amplias y mágicas; pero el deseo no transformará estos problemas en asuntos más simples que la complejidad organizada aunque tratemos de evadir las realidades y tratarlas como algo distinto de lo que son.» Jacobs (1961, p.434). El libro de Jacobs revolucionó la manera en que pensamos las ciudades. A partir del conocimiento del trabajo de Weaver: *Science and Complexity* publicado en 1948 construyó una visión de la ciudad que se correspondía con algo mayor que la suma de sus residentes, un concepto más próximo a un organismo vivo con capacidad de adaptación. «Las ciudades vitales tienen asombrosas habilidades innatas maravillosas para comprender, comunicar, planificar e inventar lo que se requiere para contrarrestar dificultades.» Jacobs (1961, pp.447-448). Bajo esta nueva visión, las ciudades toman su orden desde abajo; son máquinas de aprender, de reconocer patrones aún cuando estos no sean saludables. En resumen, a partir de este trabajo la complejidad organizada se reveló como un modo constructivo de pensar la vida urbana introduciendo en mayor medida las ideas sobre autoorganización al estudio del funcionamiento de las ciudades.

### **6.3. INTERACCIONES LOCALES Y EMERGENCIA DE COMPORTAMIENTOS GLOBALES.**

Los *sistemas ascendentes* como las colonias de hormigas, los programas de reconocimiento de letras, las ciudades y los mercados, extraen su inteligencia de la base. En estos sistemas agentes dispares crean un orden de un nivel superior sin proponérselo. Los agentes que residen en una escala comienzan a producir comportamientos que yacen en una escala superior a la suya: las hormigas crean colonias, los habitantes de una ciudad crean barrios y los individuos crean mercados. La evolución de reglas simples (la conducta de una hormiga) a complejas (el comportamiento de una colonia) es lo que llamamos “emergencia”.

Los sistemas complejos como los descritos deben su organización a la interacción de multitud de agentes que actúan con reglas locales e independientes de cualquier instrucción de un nivel superior. La emergencia requiere, además de

lo anterior, una condición adicional: es necesario que de las interacciones locales se genere una macroconducta observable. Para Metcalfe, J. (1999), lo característico del comportamiento autoorganizativo es que la formación de pautas surge de las interacciones entre los componentes elementales de un sistema. Estas propiedades no pueden encontrarse en los componentes individuales, cada uno de los cuales puede comportarse de forma diferente, es decir, son propiedades emergentes de sus interacciones.



Fuente: Lewin (1995 p.27).

***Figura 6.1. Aparición de propiedades emergentes de las interacciones entre los elementos del sistema que acaban afectando a éstas.***

Los sistemas, complejos, adaptativos y de *conducta ascendente* son capaces de llevar a cabo tareas de gran complejidad, que ningún agente por sí solo puede acometer. En esta línea y en relación con la conducta de las colonias de hormigas, Solé y Manrubia. (1996) señalan: que el comportamiento social del sistema emerge a partir de las interacciones entre las hormigas, y no es reducible a las propiedades de un individuo de la colonia. Además las propiedades emergentes acaban influyendo en los propios elementos del sistema.



En el campo de la psicología social los fenómenos como la cohesión grupal son debidos a las interacciones locales; a partir de ellas surge una propiedad emergente, la cohesión, que no es reducible al comportamiento de los miembros por separado. A su vez, la cohesión influye en los futuros procesos grupales.

Para Johnson (2003) la emergencia tal y como la entendemos hoy se basa en los siguientes principios centrales: interacción de vecinos, reconocimiento de patrones, retroalimentación y control indirecto. Local parece ser el término clave para comprender como funcionan este tipo de sistemas. Las interacciones locales conducen a un orden global, en el caso de ciertos sistemas con componentes especializados crean una inteligencia no especializada. Vemos conductas emergentes cuando los agentes individuales del sistema prestan atención a sus vecinos inmediatos y no esperan órdenes de arriba. Los agentes piensan y actúan localmente pero su acción colectiva genera un comportamiento global.

La característica común de los procesos de autoorganización es la generación espontánea de una estructura agregada: la interacción de comportamientos individuales provoca la *emergencia* de la estructura global que se produce sin que las unidades individuales del sistema tengan la intención de generarla, aparece como un resultado no intencionado, espontáneo, derivado de las acciones que toman los agentes. La *autoorganización* es, en definitiva, una teoría que explica el paso de lo local a lo global, cuando este paso implica un aumento de complejidad y produce la emergencia de algo nuevo. En el nivel de organización más global emergen propiedades nuevas en relación al nivel más elemental. Se trata, por ejemplo, de propiedades biológicas de las células vivas que son distintas de las propiedades químicas de las moléculas, también de las propiedades psicológicas de la mente humana, nuevas respecto a las propiedades fisiológicas del cerebro y por supuesto, de propiedades que aparecen a nivel de mercado y que no pueden ser inferidas a partir del comportamiento individual de cada una de las empresas u otros agentes que participan en él. Las economías externas –de aglomeración, de localización– son un ejemplo de comportamiento emergente en economía. Sabemos que las economías de aglomeración surgen en

aquellos lugares donde se produce una concentración tanto de inputs como de clientes que hace que estas localizaciones presenten para las empresas ventajas en costes frente otras localizaciones menos favorecidas. Estos menores costes, o mayores posibilidades de beneficio, no pueden derivarse del estudio del comportamiento individual de cada empresa, las economías de aglomeración - como fenómeno emergente- sólo son observables a nivel de mercado, surgen de la interacción y concentración de actividades por parte de diferentes empresas individuales. Esta concentración de actividad no se ha realizado a partir de un plan maestro, aunque luego la administración pública, a través de la intervención sobre el territorio, pueda intentar potenciar estas ventajas. Es la decisión individual de cada empresa, sus interacciones con otros agentes, lo que provoca la emergencia de estas economías. Y éstas, a su vez, condicionan la actividad y los resultados de las empresas allí localizadas y las decisiones de nuevas localizaciones en la zona. Como afirma Krugman (1997, p.134) los sistemas autoorganizados son aquellos que forman estructuras no sólo como mera respuesta a inputs externos sino que lo hacen principalmente como respuesta a su lógica interna.

Así, muchas de las características que presentan los mercados son condiciones emergentes que no pueden ser derivadas de la actuación individual de las partes. El modelo marshalliano de mercado competitivo proporciona varios ejemplos de características emergentes a nivel del mercado: las empresas son precio-aceptantes, y a largo plazo se alcanzan los beneficios normales. Estas características no pueden derivarse de la conducta de cada empresa particular sino del mercado. De igual forma, podemos considerar que los mercados minimizan costes, pero dicha minimización no podemos inferirla de una conducta minimizadora por parte de cada empresa que actúa en el mercado. En conclusión, las conductas observadas en un nivel superior (el mercado) no podemos derivarlas del comportamiento de cada agente individual –la empresa, el consumidor, el ahorrador, etc.–, aunque sepamos que emerge de la interacción de éstos. Así, la distribución de ley potencial observada en el tamaño de las empresas puede ser considerada como una característica emergente del sistema que no puede explicarse a partir del estudio del comportamiento de una empresa individual.

#### **6.4. PENSAMIENTO CENTRALIZADO VERSUS PENSAMIENTO DESCENTRALIZADO.**

Actualmente el fenómeno de la descentralización ha captado mucho interés, y se asume que diferentes fenómenos se ordenan de forma descentralizada sin la existencia de una autoridad central. Sin embargo, lo cierto es que el pensamiento centralizado está profundamente atrincherado. Cuando la gente observa pautas o estructuras en el mundo, habitualmente, ven líderes, semillas o gérmenes, donde no existen. Debido a ello, en muchos casos, como por ejemplo las conductas recolectoras de las hormigas -muchas personas creen que la hormiga reina es la que orquesta el comportamiento de la colonia –o la localización de las actividades humanas– se asume que deben existir causas centralizadas, que expliquen su origen y funcionamiento, cuando en realidad no existen.

Varias razones avalan esta fuerte tendencia de los humanos hacia el pensamiento centralizado. Muchos fenómenos en el mundo son organizados por un diseñador central. Cuando vamos a ver un espectáculo musical, asumimos (correctamente) que los movimientos de los actores y bailarines son planificados por un director y un coreógrafo. De igual forma, cuando vemos un reloj, asumimos que ha sido diseñado por un relojero y cuando observamos un paisaje de campos cultivados, sabemos que la estructura regular de los cultivos ha sido creada por la mano del agricultor. Más allá, en los sistemas sociales como las familias, o el colegio, existe un importante poder centralizado en el que la autoridad está claramente identificada. Quizás, la percepción habitual de que existe una autoridad centralizada que dirige la cuestión, nos lleva a pensar que la organización centralizada es universal en nuestro mundo. De manera que se produce una espiral de auto-reforzamiento: las personas tienden a ver el mundo de forma centralizada, de manera que se construyen herramientas y modelos centralizados, estimulando más aún la visión centralizada del mundo, Resnick (1997).

El funcionamiento de la economía también es considerado, demasiado a menudo, como un mecanismo de control centralizado. Resnick (1997, p. 121) afirma que diversos estudios demuestran que los niños parecen asumir un fuerte control gubernamental sobre la economía. Aunque, los gobiernos ejercen un papel fundamental en su funcionamiento, el papel que le atribuyen los niños está lejos del que tiene en la actualidad. En una entrevista realizada a niños israelitas entre 8 y 15 años, Leiser (1983), psicólogo, observó que cerca de la mitad de los niños entrevistados consideraban que el gobierno establece todos los precios y paga todos los salarios. Algunos niños, aunque sabían que son los empleadores los que pagan los salarios, pensaban que ese dinero es proporcionado por el Estado. Una significativa mayoría pensaba que el gobierno paga el incremento de los salarios después de una huelga. Leiser cree que los niños encuentran fácil referir los fenómenos inexplicados a acciones claramente deliberadas, con una entidad claramente definida, por ejemplo, el gobierno antes que a las “fuerzas impersonales” del mercado.

Resnick (1997, p. 134-142) propone una guía heurística para la comprensión de los sistemas descentralizados:

1. Los feedback positivos juegan, a menudo, un papel importante en la creación y comprensión de pautas y estructuras.
2. La aleatoriedad es una fuente para la creación de orden.
3. No debemos confundir los niveles, es decir la conducta del agente individual y la del “todo”. Ni una bandada es un pájaro grande, ni un embotellamiento es simplemente una colección de coches, ni un mercado es una colección de empresas.
4. Las conductas de los agentes están claramente condicionadas por el entorno, que, en algunos casos, se olvida o no se le da la importancia que merece a la hora de analizar el comportamiento de los agentes.

En general, se tiende a ver los feedback positivos como algo destructivo, que provoca efectos en espiral y que lleva a los sistemas a que pierdan el control. Por el contrario los feedbacks negativos suelen ser vistos como algo muy útil, pues permite que las cosas mantengan su control, el ejemplo más paradigmático

de feedback negativo es el termostato, que mantiene la temperatura de un lugar en el nivel deseado. La imagen negativa que se tiene del feedback positivo forma parte, incluso, de la cultura popular. Cuando pensamos en el concepto retroalimentación positiva solemos pensar en sistemas que pierden el control o que incluso, a menudo, tienen consecuencias destructivas. Por ejemplo las espirales de ventas cuando un mercado como la bolsa entra en crisis, o también otros fenómenos como los procesos de decadencia urbana, en los cuales ciertas áreas, generalmente los cascos antiguos, son abandonados (por las rentas altas) para cambiarse a otras zonas mejor equipadas; este abandono provoca que el barrio se empobrezca cayendo en una espiral en que el abandono y la degradación se retroalimentan. Pero los feedbacks, lejos de ser algo negativo, desestabilizador, son en muchos casos una necesidad para la emergencia de orden.

Arthur (1990) advierte de la importancia que tienen los feedbacks positivos en la económica, apuntando que la distribución geográfica de las ciudades y de las industrias es un ejemplo de procesos de autoorganización dirigidos por feedback positivos. Como él ejemplifica, tan pronto como un pequeño núcleo de compañías de alta tecnología comenzaron su actividad en el sur de San Francisco, se desarrolló una infraestructura para servir las necesidades de dichas compañías. Esta nueva infraestructura de nuevo alentó a que otras empresas de electrónica se localizasen en el lugar (Santa Clara County), las cuales estimularon el desarrollo de más infraestructuras, y así nació Silicon Valley.

En los ejemplos ya vistos sobre las colonias de hormigas y el moho de fango, la existencia de feedback positivos juega un importante papel. En el ejemplo del moho de fango unas pocas células desean estar unas junto a otras y formar un pequeño charco de feromonas que atraiga más células que hace que el charco se haga más grande y que a su vez atraiga a más células y así sucesivamente. Un mecanismo similar es el que se produce en la recolección de hormigas: unas pocas hormigas descubren algo de comida y forman un rastro de feromonas que atrae cada vez a más hormigas, de manera que refuerza el rastro.

La segunda característica resaltada por Resnick (1997), sobre el comportamiento de los sistemas descentralizados, se refiere al papel que tiene la aleatoriedad, que es capaz de ayudar a crear orden. Al igual que los feedback positivos, la aleatoriedad tiene una mala imagen, mucha gente la ve como algo más malo que bueno, incluso puede considerarse como algo destructivo. La aleatoriedad se suele ver como lo opuesto al orden: la aleatoriedad deshace el orden, hace que las cosas estén desordenadas.

En los sistemas autoorganizados el germen, el origen de un proceso, no es impuesto externamente. Lejos de ello, los sistemas de autoorganización crean los gérmenes por si mismos, y es en esta cuestión donde la aleatoriedad juega un papel crucial. En muchos sistemas autoorganizados las fluctuaciones aleatorias actúan como gérmenes a partir de los cuales la estructura crece.

En los programas informáticos sobre tráfico de Starlogo, cuando los coches circulan a velocidades iniciales iguales no se forman atascos, se mantienen espacios similares entre los coches. Pero si hay algo de aleatoriedad en las velocidades iniciales, se producen pequeñas fluctuaciones en las densidades de tráfico a lo largo de la carretera, estas fluctuaciones son el germen de atascos de tráfico. Luego los feedbacks positivos acentúan las fluctuaciones en la densidad generando atascos. Una situación similar se puede observar en el modelo de segregación –creado por Schelling- y que será desarrollado con más profundidad en el siguiente capítulo. En este caso las fluctuaciones aleatorias en las densidades de cada una de las razas son reforzadas por feedbacks positivos, produciendo clusters de vecindades integradas por personas de una única raza.

La combinación de fluctuaciones aleatorias y feedback positivos juegan un papel muy importante en la emergencia de orden en sistemas descentralizados. Un buen ejemplo, para comprender el papel que tienen la combinación de estos dos elementos, es el programa de simulación de Starlogo sobre el moho de fango. En este caso el origen de los clusters se produce cuando unas pocas células, en su deambular, se encuentran al estar vagando unas cerca de otras (la aleatoriedad y la densidad de células vagando, permite que varias de ellas se encuentren), esto causa una fluctuación aleatoria en la densidad de las feromonas, y esa mayor cantidad de feromonas provoca la atracción de nuevas células al cluster. El

feedback positivo produce regiones con alta densidad de feromonas que son regiones altamente atractivas para otras células, atrayendo cada vez a nuevas células y provocando que la densidad de la feromona crezca hasta llegar a ser muy elevada, atrayendo a su vez más y más células y así sucesivamente. Como veremos en el siguiente capítulo, existen paralelismos en las ideas desarrolladas en los modelos sobre el tráfico y el moho de fango con el modelo de las *edge cities* desarrollado por Krugman.

La aleatoriedad juega, además, otro papel importante en algunos procesos de autoorganización, ya que permite que el sistema explore múltiples opciones a la vez. Esta cuestión ha sido tratada por los estudiosos del comportamiento de las hormigas, Deneubourg et al. (1986) argumentan que la “aleatoriedad de la hormiga” no es un estado defectuoso en la pauta evolutiva “hacia un irrealista sistema determinista de comunicación”; por el contrario, la aleatoriedad es una conducta adaptativa evolucionada. Deneubourg describe un experimento con dos fuentes de comida en las proximidades de la colonia: una de las fuentes es más rica en comida pero esta más alejada, y la otra es de inferior calidad pero está más próxima al hormiguero. Inicialmente las hormigas descubren la fuente de inferior calidad y forman un fuerte rastro hacia ella, pero también hay algunas hormigas que vagan fuera del rastro. Estas “hormigas perdidas” descubren la fuente más rica y forman un nuevo rastro. Como en las hormigas, la cantidad de feromonas que determinan la intensidad del rastro depende de la riqueza de la fuente de comida, de pronto muchas de las hormigas pasan a seguir el rastro de la nueva fuente. De manera que cuando las hormigas acaban con una fuente de alimentación no tienen porque ponerse a la búsqueda de otras fuentes, la aleatoriedad de las hormigas permite que la colonia sea capaz de explorar varias fuentes a la vez, aunque la mayor parte de las hormigas se estén encargando de recolectar la comida de la fuente de alimentación más atractiva en esos momentos.

Otra de las características destacadas por Resnick (1997) cuando pensamos o investigamos sobre sistemas descentralizados, es la necesidad de realizar una clara distinción entre los distintos niveles del fenómeno. Las interacciones que se

producen entre elementos que pertenecen a un nivel hacen aparecer nuevos tipos de objetos en otro nivel: las interacciones entre las células del moho de fango hacen que surjan clusters de moho de fango, las interacciones entre hormigas dan lugar a la aparición de rastros de recolección, las interacciones entre pájaros dan lugar a bandadas y las interacciones entre decisiones de asentamiento de las personas y localización de empresas da lugar a una jerarquía en la distribución del tamaño de las ciudades (ley rango-tamaño). En muchos casos, los objetos en un determinado nivel llegan a ser muy diferentes de los objetos de otros niveles.

En los ejemplos anteriores, son los elementos de más bajo nivel -pero no solo por ellos mismos, sino por sus interacciones- los que definen la emergencia del objeto de nivel superior. Aunque los coches que forman un atasco estén cambiando continuamente -unos salen y otros entran en la vía- como también ocurre con las empresas que forman un mercado, el objeto de nivel superior permanece.

La última de las características subrayada por Resnick es el papel relevante que juega el entorno en los sistemas descentralizados. En *Sciences of the Artificial* (1969) Herbert Simon describe una conocida escena en la cual una hormiga está paseando por una playa. Simon señala que aunque la pauta seguida por la hormiga puede ser bastante compleja, la complejidad de la pauta, no es necesariamente un reflejo de la complejidad de la hormiga. Lejos de ello, puede en realidad reflejar la complejidad de la playa. Simon nos advierte del importante papel que tiene el entorno en la conducta que exhiben los agentes individuales. Como señala Resnick (1997, p.42), las personas en muchos casos consideramos el entorno como algo sobre lo que se actúa no como algo con lo que se interactúa, tendemos a centrarnos en la conducta de los objetos individuales, ignorando el entorno que rodea (y con el que interactúan) los objetos.



## 6.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE AUTOORGANIZACIÓN

Para explicar brevemente las principales características de los procesos de autoorganización nos referiremos a la definición que realiza Capra (1998, p.103): «...podemos decir que autoorganización es la aparición espontánea de nuevas estructuras y nuevos modos de comportamiento en sistemas lejos del equilibrio, caracterizada por bucles de retroalimentación internos y descrita matemáticamente en términos de ecuaciones no lineales».

La primera característica a resaltar en los sistemas de autoorganización es la emergencia, que como hemos visto supone la aparición de nuevas propiedades en los sistemas como consecuencia de los procesos de interacción de los elementos. Tanto en los sistemas cibernéticos como en los sistemas biológicos, se ha observado que la reiteración del comportamiento de los componentes, que en principio parece que da lugar a pautas aleatorias del sistema, al cabo de un tiempo, comienza a generar pautas de comportamiento que ya no son aleatorias. Es decir, “emergen” nuevas propiedades y nuevas estructuras dentro del sistema, Rodríguez y Vara (2003, p.198).

La segunda propiedad común de los sistemas autoorganizados es su condición de sistemas abiertos que operan lejos del equilibrio. Es necesario que haya un flujo constante de materia y energía a través del sistema para que tenga lugar la autoorganización. El flujo mantiene al sistema permanentemente apartado del equilibrio, siendo esta situación la que provoca la aparición de nuevas propiedades dentro del mismo. El concepto de *estructura disipativa* de Prigogine resume perfectamente esta idea: mientras la estructura recibe energía del exterior, aparece la emergencia de nuevas propiedades como resultado del comportamiento interno del sistema que se refuerza por bucles de retroalimentación positiva.

La tercera característica de la autoorganización, que resalta Capra en su definición es la retroalimentación común a todos los modelos de autoorga-

nización. La interconectividad no lineal de los componentes del sistema van determinando nuevas estructuras influyendo en los comportamientos sucesivos, generando así mecanismos de retroalimentación y procesos irreversibles característicos de la dinámica no lineal. Como afirma Saura (2002, p.182) en el marco de la dinámica no-lineal: «Una pequeña perturbación puede provocar efectos de gran envergadura, mientras que un sistema sometido a grandes perturbaciones puede mostrar estructuras más ordenadas, contrariamente a lo que podría suponerse.».

Dadas las características de los sistemas complejos autoorganizados se entiende que el estudio y modelización de este tipo de sistemas sólo se ha podido desarrollar con la utilización de nuevas técnicas como la matemática del caos o de los sistemas no lineales. Para el estudio de la autoorganización los conceptos básicos de la dinámica tradicional como equilibrio y estabilidad dejan de tener sentido mientras que nuevos conceptos como irreversibilidad, retroalimentación o la emergencia se imponen como herramientas indispensables.

Decker (2000) considera como principales características de los sistemas complejos autoorganizados:

1. Son sistemas abiertos, intercambian energía con el entorno e importan entropía negativa evolucionando así hacia un mayor orden.
2. Presentan interacciones locales a diferentes niveles.
3. Se dan mecanismos de retroalimentación (positiva y/o negativa).
4. Son, generalmente, sistemas con muchos componentes; estos son parcialmente autónomos y tienen diferentes reglas de interacción entre ellos.
5. El sistema presenta propiedades emergentes.
6. El comportamiento es dependiente de la trayectoria, está intrínsecamente ligado a la historia del sistema y la irreversibilidad juega un papel central.

Esta última característica es especialmente relevante en los fenómenos económicos de autoorganización, en palabras de Saura (2003, p. 229): «Cual-

quier factor que discrimine en un determinado instante a favor de un cierto comportamiento puede seleccionar comportamientos futuros aunque estos pudiesen ser considerados, a priori, menos eficientes. En la evolución se pueden poner en marcha mecanismos de reforzamiento que generan un proceso dinámico irreversible que imposibilite el acceso del sistema a las mejores alternativas».

En el siguiente capítulo profundizaremos en los procesos de autoorganización en economía, desde los planteamientos más clásicos de Smith y Menger, pasando por Hayek, quién parece ser el que más ha profundizado en el concepto de mercado como sistema autoorganizado, hasta los planteamientos más interdisciplinarios de Schelling y Krugman.

## **CAPÍTULO 7**

### **AUTOORGANIZACIÓN EN ECONOMÍA**

«Actualmente, la complejidad es un movimiento amplio, pujante, e interdisciplinario cuyo objetivo es, entre otros, buscar paralelismos entre fenómenos que aparentemente son dispares. El enfoque de los sistemas complejos puede aplicarse en muchas áreas de investigación, y muchos son los que han reclamado su aplicación en el estudio de fenómenos económicos. Sin embargo, lo cierto es que hasta la fecha este movimiento ha pasado por alto –salvo muy contadas ocasiones y generalmente no por iniciativa de los economistas– las ciencias económicas. Sin embargo, entre las ciencias sociales, es la Economía la que más se ajusta a este tipo de análisis, donde el resultado final es la causa de la conducta de muchos individuos que no puede extrapolarse a partir de la conducta de cada uno de ellos.».

Krugman (1996, 1997, p.19).

#### **7.1. INTRODUCCIÓN**

En capítulos anteriores hemos tratado las características que definen los sistemas y procesos de autoorganización, encontrando suficientes fundamentos para considerar que la economía se comporta como un sistema complejo autoorganizado. En palabras de Saura (2003, p.230): «Parecería indiscutible que los procesos económicos tienen todos los componentes exigibles a los procesos complejos: muchos y diferentes componentes con comportamientos parcialmente independientes y organizados en diferentes estructuras; esos elementos interactúan entre sí y con su entorno y son capaces de comunicarse, aprender,

corregir, imitar, competir y cooperar. Individuos capaces de adaptarse a su entorno y modificarlo generando, a través del tiempo, nuevas estructuras y nuevas restricciones».

Más allá de los planteamientos desarrollados por otras ciencias, la idea del mercado y la economía como un sistema autoorganizado es bastante antigua en la teoría económica, ya fue esbozada por Adam Smith en su descripción del funcionamiento del mercado y su metáfora de la *mano invisible*. Sin embargo, como ya apuntamos, la autoorganización no parece haber suscitado excesivo interés, para los economistas, a lo largo del tiempo. A pesar de ello han emergido, aunque de forma bastante aislada, pensadores que se han ocupado de esta cuestión. Han sido, especialmente, relevantes las aportaciones que desde la escuela austriaca han tratado de profundizar en el mercado como un proceso autoorganizado, destacando las figuras de Carl Menger y Friedrich Hayek. Otra figura especialmente relevante ha sido Thomas Schelling, quien, desde un enfoque muy particular, estudia los fenómenos de emergencia y autoorganización en procesos sociales y económicos, llegando a conclusiones muy similares a las alcanzadas en otras ciencias y sin ningún contacto aparente con éstas. Por último, es necesario hacer referencia a los trabajos de Krugman que destacan por su marcado carácter trasdisciplinar, sus planteamientos extraen metáforas e ideas que han surgido en tipos de sistemas complejos en otras disciplinas y los utiliza como herramientas para interpretar fenómenos económicos. Más recientemente, la conocida como *economía evolutiva* se ocupa directamente de la cuestión, considerando que los fenómenos económicos son interpretables como sistemas complejos autoorganizados con capacidad de adaptación. Para esta escuela los planteamientos de las teorías de la complejidad y especialmente la analogía biológica juegan un importante papel en la comprensión de cómo funciona la economía y los mercados.

Rodríguez y Vara (2003, p.195) señalan que el estudio de fenómenos de autoorganización en teoría económica se ha producido desde dos vertientes básicas: en primer lugar, algunas teorías importan conceptos y planteamientos procedentes de otras disciplinas científicas, que abordan la autoorganización,

como la física y la biología (ver capítulos 4 y 5). El segundo tipo de estrategias ha tratado de averiguar si los procesos económicos son básicamente autoorganizados, o no, partiendo del pensamiento económico puro, y utilizando metodologías propias. Dejando por un momento de lado la pertinencia metodológica de los dos tipos de estrategias, resulta evidente que el pensamiento económico se ha servido de ambas, no sólo como formas de obtención de resultados, sino también en el caso de la primera, como fuente de inspiración a la hora de formularse preguntas. Inicialmente nos centraremos en aquellos trabajos que abordan la autoorganización dentro del campo de la economía, bien representados por el pensamiento de Menger y especialmente Hayek. Pasaremos después a tratar trabajos más recientes que abordarán la cuestión desde una perspectiva más trasdisciplinar.

## **7.2. EL MERCADO COMO UN SISTEMA COMPLEJO AUTOORGANIZADO**

Adam Smith primero y más tarde Carl Menger y la Escuela Austriaca tuvieron un interés común por explicar el surgimiento de las instituciones sociales. Dentro de los planteamientos de la escuela austriaca, y en tiempos más recientes, el trabajo de Hayek es el que ha escarbado más profundamente en el fundamento de estas instituciones. Entre todos ellos hay un punto en común: en muchos casos el surgimiento de las instituciones se produce de forma espontánea, aunque los planteamientos de los autores diferirán sustancialmente a la hora de explicar el origen de la emergencia.

### ***7.2.1. Carl Menger y el origen de las instituciones***

Para Adam Smith, el surgimiento de las instituciones sociales se deriva de ciertas pautas de comportamiento que adoptan convencionalmente los individuos, en función de su utilidad para la consecución de los fines que éstos persiguen. Menger no compartía con Smith ni con la economía clásica su visión contractual utilitarista del origen de las instituciones. La correcta comprensión de estos

fenómenos es, a juicio de Menger, la de Burke –perteneciente a la escuela histórica alemana del derecho-, que fue el primero en darse cuenta de que ciertas estructuras sociales tenían un origen espontáneo, esto es, como resultado inesperado del desarrollo histórico. Menger critica abiertamente el liberalismo racionalista de Smith y su esfuerzo por reformar instituciones que a veces no se han entendido todavía suficientemente, Menger (1883,1996, pp.158-59). Su gran aportación es llamar la atención en el carácter espontáneo del origen de muchas instituciones sociales, es decir, advertir que estas pautas adquiridas por la sociedad no son el resultado de un diseño, sino la consecuencia inesperada de las acciones de los individuos.

Los planteamientos de partida de Smith y Menger, respecto al origen de las instituciones, por medio de las cuales se genera el orden social difieren sustancialmente. Mientras que para Smith el origen está en la aparición de instrumentos transitorios y contingentes relacionados con las estructuras de creencias y expectativas, que dado el contexto, forme el individuo; para Menger se trata de algo creado orgánicamente por las sociedades y que se ha transmitido a lo largo generaciones enteras de seres humanos.

La teoría del origen del dinero de Menger constituye un buen ejemplo para ilustrar la similitud de sus planteamientos con lo que hoy denominamos fenómenos de autoorganización. Menger parte del análisis de las relaciones de mercado en una economía de trueque donde no existe un medio de pago generalizado. En este tipo de economías, para que el intercambio tenga lugar, es necesario que el valor de uso del bien adquirido sea mayor al valor de uso del bien o bienes ofrecidos. Así, en las economías de trueque existe el problema fundamental de la necesidad de una coincidencia física entre dos personas que generalmente tendrán opiniones dispares acerca del valor de uso de un mismo bien. En esta situación no puede desarrollarse la división del trabajo y la generación de bienes destinados a la venta, gran parte de las necesidades de las personas no podrán ser satisfechas, pues solo podrán satisfacerse aquellas que se deriven del intercambio directo. Menger (1997, p.320), considera que estas dificultades serían insuperables si «la misma naturaleza de las cosas no hubiera

aportado un medio auxiliar gracias al cual, y sin que sea necesario un especial acuerdo entre los hombres y menos aun una imposición estatal, los agentes económicos de todos los lugares han establecido, con fuerza incontestable, una situación en la que parecen totalmente eliminadas las anteriores dificultades».

Los planteamientos de Menger tras pasados al actual lenguaje de la autoorganización conducen a poder afirmar que el dinero es una propiedad que emerge en la economía de trueque, es una propiedad que está latente en la *misma naturaleza de las cosas*: si para Smith el dinero sería el resultado de una convención, para Menger es algo que se encuentra como potencialidad a descubrir dentro de ciertas formas de organización de las relaciones humanas, concretamente en economías de trueque. El intercambio a través del dinero surge espontáneamente a partir del comportamiento individual de sus componentes en interacción, debido a que son capaces de darse cuenta de que existen otras formas de actuar que permiten solventar las restricciones que impone la economía de trueque. A medida que ésta se afianza los individuos intentarán intercambiar sus productos por otros que aunque no tengan valor de uso para ellos si tengan mayor capacidad de venta, así aumentarán las posibilidades de encontrar aquello que necesitan. Este proceso, una vez se hace habitual y se convierte en costumbre conduce a que los agentes terminen acaparando un número reducido de mercancías, pudiendo llegar a ser una sola, la que se utilice como medio de pago, Rodríguez y Vara (2003, p.214). Aparece de forma espontánea una nueva propiedad en el sistema que provoca una transformación de la forma organizativa de la economía de trueque hacia una economía monetaria. Con este cambio se abren nuevas posibilidades para la división del trabajo y la producción para la venta como consecuencia de la eliminación de obstáculos.

### ***7.2.2. Friedrich Hayek y el orden extenso***

De todos los discípulos de Menger y dentro del pensamiento austriaco en general, Hayek fue quién dedicó más esfuerzo al origen de las instituciones. Generalizó el análisis de las instituciones sociales “orgánicas” al conjunto de la sociedad, acuñando la expresión de «orden espontáneo» para referirse a un orden social caracterizado por su aparición no intencionada, al igual que el conjunto de



instituciones que la componen (mercado, dinero, derecho, lenguaje, etc.). «Sin embargo, y a diferencia de Menger, Hayek era un idealista kantiano para el que el origen de las instituciones no era algo que perteneciese al “plan de la realidad”, sino que era algo cuyo origen se puede rastrear hasta la estructura cerebral de las personas.», Rodríguez y Vara (2003, p.213).

Hayek entiende el orden social como un conjunto de normas que permiten la supervivencia de poblaciones que superan el ámbito familiar o tribal. Distingue entre dos tipos de ordenes sociales: el orden tribal, basado en el comportamiento instintivo, válido para asegurar la supervivencia de pequeñas comunidades, y el orden extenso, un conjunto de normas generadas a través de un proceso de selección social –de carácter distinto al natural–, que permiten la supervivencia pacífica y cooperante de grupos humanos de gran tamaño. Según Hayek la superioridad del orden extenso queda manifestada por la gran cantidad de humanos que viven actualmente bajo este sistema de normas en relación al grupo que vive bajo el sistema tribal.

El punto central de la cuestión planteada por Hayek radica en determinar cómo surgen nuestros esquemas morales, y que implicaciones puede tener su proceso de formación sobre las instituciones políticas y económicas. En la visión de Hayek las normas se transmiten a través de un proceso de selección de aquellas que son más eficientes para la supervivencia de la comunidad o de la sociedad. Pero a partir de un determinado momento la razón o el fin para el cual la norma o pauta surgió se olvida y simplemente se utiliza porque (sin saberlo) garantiza la pervivencia del grupo humano que la adopta. El proceso de aparición y adopción de la norma es espontáneo, ya que el proceso de imitación o aprendizaje de ésta no es diseñado por nadie, ni tiene por que atenerse a la finalidad para la que fue creado. Si el proceso de adaptación y propagación de una pauta (o norma) no es satisfactorio, el grupo humano en el que ésta se transmite desaparece en el curso de la historia. Por el contrario si el proceso es satisfactorio el grupo pervive y con él la norma. En conclusión: «nuestros esquemas morales y nuestras instituciones sociales no son sólo consecuencia de determinadas decisiones intencionales sino que surgen como parte de un proceso

evolutivo inconsciente de autoorganización de una estructura o un modelo.» Hayek (1988, 1997, p.193).

*El orden extenso como forma de captar información*

El orden extenso es para Hayek un mecanismo que tiene la capacidad de captar más información del sistema, es capaz de recoger y aprovechar un vasto conjunto de conocimientos diseminados que ningún organismo planificador central, y menos aún cualquier individuo, podría aprehender o controlar. Esta cuestión, la dispersión en el conocimiento ya fue percibida por Smith (1776, 1976:II, p.487): «el tipo de industria a la que el capital deba ser dedicado, y en qué rama de la producción implicará su incorporación superior valor, son cosas que, evidentemente, cada individuo, conocedor de las circunstancias del caso, podrá establecer con más acierto que cualquier estadista o legislador». Las diversas instituciones integradas en el orden extenso –entre ellas el mercado– nos permiten recoger esa diseminada información y establecer la existencia de un organismo supraindividual. Una vez desarrolladas las instituciones y tradiciones basadas en tales modelos no será necesario el acuerdo (imprescindible a nivel tribal) sobre fines comunes, y será posible la utilización de la información ampliamente diseminada, así como el mejor aprovechamiento de las habilidades de cada cual para alcanzar una pluralidad de fines.

Una de las características más sobresalientes de los sistemas complejos que se autoorganizan de forma espontánea es la incapacidad de los agentes de abarcar la totalidad. Esta idea es transmitida por Hayek cuando nos habla del mercado: «Ni los comerciantes, ni sus colaboradores locales (cual aconteció también con sus primitivos predecesores) suelen conocer con detalle las necesidades concretas que satisfacen sus esfuerzos. Gran número de ellas, de hecho, ni siquiera se materializan hasta momentos situados tan en el futuro que nadie está en situación de valorarlas hoy ni siquiera de manera aproximada.» Hayek (1988, 1997, p. 240). Se llega a la conclusión de que la descentralización de las decisiones permite la utilización de mayores niveles de información. El mercado es un mecanismo a través del cual se facilita información a los diferentes actores, para

que éstos valoren las diferentes alternativas que tienen dados sus recursos, teniendo en cuenta que el conocimiento directo que éstos poseen del entorno forma parte de los recursos. Con otras palabras, Hayek nos está describiendo la economía o más concretamente el mercado como un sistema ascendente, donde la información se extrae de la base y a partir de las interrelaciones producidas en los niveles inferiores emergen comportamientos en niveles superiores.

*El mercado un mecanismo dentro del orden extenso*

El orden extenso no surgió de repente, necesitó de un largo periodo de tiempo, centenares de miles de años. Las diversas estructuras, tradiciones, instituciones y otros elementos que lo integran fueron apareciendo gradualmente a medida que se iban seleccionando los modos habituales de conducta. «Esta evolución tuvo lugar a través de la difusión de nuevas prácticas mediante un proceso de transmisión de hábitos adquiridos análogo a la, en otros aspectos muy diferente, evolución biológica. participando en él, surge en tiempos más recientes, el orden de mercado.» Hayek (1988, 1997, p.203).

En la visión de Hayek la dinámica de los sistemas sociales no puede ser interpretada desde una perspectiva darwiniana pues la civilización y la cultura no parecen algo que pueda forjarse o transmitirse genéticamente. Lo que se produce es una transmisión de hábitos y conductas; como Carr-Saunders<sup>38</sup>, advirtió tanto a nivel individual como colectivo, se establece una selección natural de los hábitos existentes, al igual que acontece con los caracteres físicos y mentales. En la incesante competencia establecida entre grupos adyacentes, los que practican los hábitos más convenientes disponen de una ventaja relativa sobre los que asuman otros menos adecuados.

El sistema de mercado es, en la visión de Hayek, un orden que resulta de la puesta en marcha y selección de hábitos y conductas que han conducido a las poblaciones a un mejor nivel de vida cuyo origen se remonta a tiempos anteriores al nacimiento de la agricultura. Como el recuerda, en el continente europeo hay

---

38. Citado en Hayek (1997, p.203).

indicios de comercio entre puntos muy alejados en la época paleolítica, es decir hace casi 30.000 años, Herskovits (1948,1960); también se tiene constancia de que ocho mil años atrás, Catal Hüyük en Anatolia y Jericó en Palestina, se habían convertido en centros comerciales entre el Mar Negro y el Mar Rojo, incluso antes de que hubiera aparecido el comercio de la cerámica y los metales<sup>39</sup>.

Si escarbamos en el origen del mercado como “mecanismo” que surge del orden social podemos remontarnos al nacimiento del intercambio. Hayek (1988, 1997, p.236) lo narra así: «Los vagamente definidos territorios de la tribu hallaríanse desde tiempos muy remotos entrelazados por las relaciones comerciales establecidas entre individuos que se aventuraran a asumir esas nuevas prácticas, lo que daría lugar, a la larga, a la aparición de contactos mercantiles que, a grandes distancias, transmitirían una especie de “micro-elementos” propiciadores del comercio. Todo ello permitió la aparición de la civilización sedentaria en nuevos lugares y, consiguientemente, de la especialización, procesos que culminarían finalmente en las expansiones demográficas. Se inició, pues, una especie de reacción en cadena en virtud de la cual la incrementada densidad poblacional facilitaba el descubrimiento de nuevas oportunidades de especialización, lo que permitiría una ulterior expansión de la división del trabajo, impulsora a su vez de aumentos en la población y mayores niveles de vida, y por ende, de nuevos incrementos demográficos, y así sucesivamente». «Gradualmente fue advirtiéndose que el orden de mercado permite, dentro de evidentes límites, hacer uso del conocimiento personal para alcanzar los propios objetivos, sin que para ello tenga nadie que ser consciente de

---

39. Leakey (1981, p.212): «La moderna arqueología confirma que la actividad comercial supera en antigüedad a la agricultura, así como a cualquier otra modalidad productiva regular.». Con posterioridad hay constancia de que «a finales del séptimo milenio antes de Cristo existía ya una red de rutas comerciales, tanto marítimas como terrestres, a través de las cuales la obsidiana se enviaba desde la isla de Melos hasta tierra firme de Asia Menor y Grecia» Hayek (1997, p. 234). Hay también «pruebas de la existencia de extensas redes comerciales entre Beluquistán (Paquistán occidental) y determinadas regiones del continente asiático, incluso con anterioridad al año 3.200 a.C.» Childe (1936,1981, p.19). Por último, es sabido que la economía del Egipto predinástico descansaba firmemente en el intercambio mercantil, Pirenne (1934). Citados en Hayek (1997, p.234)

la mayor parte de los detalles del orden en el que se desarrolla su propia actividad.» Hayek (1988, 1997, p.244).

La capacidad de adaptación a lo desconocido es la clave de todo proceso evolutivo, el sistema constantemente debe ir adaptándose a los cambios intentando ajustar su estructura, ya que, el futuro es algo que nadie puede anticipar. En su esfuerzo por adaptarse, la información que poseen los agentes consiste en señales que les lanza el entorno, es una información siempre de carácter parcial. Los individuos con su información limitada responden a esas señales y a través de la interacción de largas cadenas de comportamientos individuales van llegando, a los agentes individuales, combinaciones de datos y abstractas señalizaciones que, a su vez, se irán enriqueciendo a medida que los agentes van respondiendo y añadiendo complejidad al sistema. «Pese a la complejidad de proceso en cuestión, la estructura del conjunto de comportamientos así generados tiende a adaptarse, a través de estas señales parciales y fragmentarias, a unas condiciones que ningún individuo ha previsto o conocido. Aun así, esta adaptación jamás llega a ser perfecta. Y ésta es la razón de que semejante estructura sobreviva, asegurando al mismo tiempo la supervivencia y prosperidad de cuantos se benefician de sus ventajas.», Hayek (1988, 1997, p.284).

#### *Diversidad e información*

En esta visión, el orden es deseable porque es capaz de ofrecer oportunidades de otro modo inexistentes; las oportunidades dependerán, en gran medida, de la variedad de los elementos, pues las diferencias entre individuos potencian el poder colaborador del grupo más allá de la mera suma de los esfuerzos individuales. «La colaboración sinérgica permite poner en juego posibilidades creativas que nunca habrían llegado a producirse si los distintos sujetos hubieran tenido que luchar aisladamente por su supervivencia», Hayek (1988, 1997, p.289). La variedad –el desorden– y la complejidad son necesarios para que pueda surgir un orden espontáneo (autoorganizado) y de carácter ascendente por dos motivos básicos: uno, cuanto mayor sea la variedad es más posible establecer sinergias e intercambios entre los agentes y en segundo lugar,

cuanto mayor sea la variedad el sistema tendrá más capacidad para recoger información que se encuentra muy dispersa. Además la especialización libera y fomenta el desarrollo de individuos cuya específica contribución basta para garantizarles el sustento. La información está tan diseminada que las oportunidades crecen con la especialización y diversificación.

La diversidad de los agentes que operan en el mercado siempre ha sido una cuestión controvertida en la modelización económica, el análisis neoclásico prescinde de la diversidad al crear un modelo de determinación de los precios en el que el comportamiento del lado de la oferta se basa en un instrumento conceptual: la *empresa representativa*. Sin embargo, como ya vimos en el capítulo 3, la evidencia empírica muestra que la distribución del tamaño de las empresas se ajusta a las leyes potenciales y por lo tanto que se trata de una distribución libre de escala. No existe un tamaño característico, todo lo contrario los mercados son abastecidos por empresas de multitud de tamaños, la variedad es la norma no la uniformidad, por estas razones nos parece que este enfoque que Hayek, al reconocer la diversidad, es mucho más útil para nuestro trabajo que los desarrollos tradicionales de la microeconomía estandar.

La información –que nada tiene que ver con la que posee cada individuo concreto– surge a lo largo de un proceso de interacción de opiniones, dispersas y diferentes, de millones de individuos que se comunican entre sí, se trata por lo tanto de un sistema ascendente. El mayor nivel de desarrollo de nuestra sociedad actual, nuestra mayor capacidad de satisfacer necesidades no se deriva del avance de nuestra inteligencia a nivel personal, sino de la existencia de procesos que permiten combinar mejor la dispersa información existente. A medida que aumente la diversidad lo hará la amplitud del orden, éste último propiciará la aparición de nuevos procesos diferenciadores, y de nuevas posibilidades y sinergias que pueden ampliarse indefinidamente. «Si las cosas fueran de otro modo -si todos fuéramos, por ejemplo, iguales y ninguna nueva diferencia a nivel personal pudiera surgir-, serían muy escasas las ventajas que podría ofrecernos la división del trabajo (exceptuada, quizá, la de la colaboración entre gentes emplazadas en diferentes ámbitos geográficos), y mínimas las que se derivarían de la coordinación del esfuerzo de muchos sujetos. Quedaría descartada la

posibilidad de establecer órdenes sociales de cierta entidad y amplitud.», Hayek (1997, p.289). Así pues, la variedad de tamaños es más lógica que la idea de un tamaño óptimo para las empresas que operan en un mercado, pues la variedad permite la aparición de sinergias y a su vez permite en mayor medida aprovechar una información muy dispersa.

Por otro lado, para la autoformación de estructuras colectivas es necesario que existan condiciones de carácter general que permitan que cada elemento logre encontrar su lugar en el orden. El sistema deberá también excluir aquellos elementos o aspectos que no sean capaces de adaptarse a las normas requeridas, las limitaciones aumentarán a medida que aumenta la complejidad del orden. El individuo que ya se encuentre integrado en el orden extenso solo podrá conocer su entorno más inmediato, y deberá realizar un esfuerzo de exploración de éste para establecer y mantener la comunicación que conforma la base de todo orden extenso. Pero para que un agente esté debidamente informado es necesario que la dispersa información existente sea utilizada por un amplio conjunto de agentes, diversos y desconocidos, sólo a partir de esta dispersión es posible que la información que poseen miles o millones de agentes pueda generar una especie de estructura o esquema. Cada agente es un eslabón de una cadena a través de la cual se transmiten las señales que facilitan la adaptación individual de cada uno a un conjunto de circunstancias que globalmente nadie puede conocer. «El orden de cooperación así establecido, aun cuando sin duda imperfecto y en muchas ocasiones quizá poco eficiente, logra integrar entornos superiores a los que podría abarcar cualquier otro esquema que fuera fruto de creación intencionada y que estuviera basado en la colocación en el lugar “apropiado” de cada uno de sus elementos.» Hayek (1997, p.295).

Podemos decir de forma resumida que, en la visión de Hayek, el control descentralizado de los recursos garantiza la generación y utilización de mayores volúmenes de información de los que podría ofrecernos cualquier otro modelo basado en mecanismo de asignación centralizada. Y en esta descentralización, la comprensión del papel que desempeña la transmisión de información constituye la clave para entender el funcionamiento de los órdenes extensos. Es la info.-

mación la que está altamente dispersa y este hecho es, a juicio de Hayek, la causa primordial que confiere mayor superioridad o mejor funcionamiento a los órdenes espontáneos que a los basados en decisiones centralizadas. «La aparición, por ejemplo, de un mejor procedimiento para fabricar tuercas, fibras químicas, vidrio o papel proyectará de tal modo sus beneficios sobre toda la economía que será imposible captar concretamente todos los nexos de causa y efecto.» Hayek (1997, p.303)

Por último, parece interesante resaltar que, aunque no en sus principios, Hayek era conocedor del desarrollo de las teorías de autoorganización y complejidad en otros campos de la ciencia. Es más se muestra partidario de la utilización de éstos en el desarrollo de ideas y modelos sobre autoorganización en economía. «Cuando comencé a ocuparme de estas cuestiones creí encontrarme prácticamente solo en el estudio del desarrollo evolutivo de tales complejas órdenes que se autosustentaban. Desde entonces, sin embargo, investigadores dedicados al estudio de otros problemas semejantes –bajo diferentes apelativos como los de autopoiesis, cibernética, homeostasis, órdenes espontáneos, autoorganización, sinergia, teoría de sistemas, etc.- han proliferado de tal manera que aquí sólo podemos aludir a un reducido número de ellos. Esta obra es, por lo tanto, simple tributaria de una corriente, cada vez más caudalosa.» Hayek (1997, p.193).

### **7.3. MICROMOTIVOS DE LOS AGENTES Y MACROCONDUCTA DEL AGREGADO. ALGUNOS MODELOS DE AUTOORGANIZACIÓN EN ECONOMÍA**

En 1978 se publica el libro de Schelling titulado: *Micromotivos y macroconducta*. Un trabajo que si bien puede afirmarse que pasó desapercibido durante algunos años es hoy reconocido como uno los trabajos pioneros en el campo de la economía que tratan, estudian y profundizan en los procesos económicos como procesos de los que emerge una autoorganización. El trabajo de Schelling tiene como objetivo mostrarnos que existen procesos en los cuales emerge una



conducta agregada de forma espontánea, la conducta es observable a nivel del agregado, pero éste no puede ser percibido en su totalidad por ninguno de los agentes, es una conducta emergente. Los micromotivos de los agentes y sus interacciones dan lugar a la emergencia de la macroconducta. Cuando Schelling desarrollo sus trabajos no tuvo conexión alguna con los desarrollos en el campo de la complejidad y autoorganización, como él declara en *Micromotivos y Macroconducta* el libro es una recopilación de trabajos desarrollados en la década de los setenta, una época en la cual estos campos estaban dando sus primeros pasos o por lo menos estaban lejos de ser un enfoque definido con conceptos y fundamentos bien consolidados. Schelling descubre que en los sistemas formados por agentes con capacidad de decisión emergen comportamientos (estructuras en la termodinámica) de forma espontánea. Sabe que ese orden surge sin la intención deliberada de los agentes, y que la conducta o pauta que emerge solo es observable a nivel del sistema o del conjunto. Es más advierte, al igual que hacen después otros como Hayek que las interacciones tienen carácter local, que el sistema es ascendente y que a partir de estas interacciones surge el macrocomportamiento.

Schelling (1978, 1989, p.20) al igual que Hayek reconoce que ya Adam Smith consideró la idea la economía como un proceso autoorganizado: «En la economía a menudo se tiene la impresión de que gran parte de esta actividad individual no dirigida y no canalizada conduce a resultados agregados que no son demasiado malos; de hecho son tan buenos como los que cabría esperar si alguien tomara el mando y resolviera lo que hubiera que hacer y lograra que todos hicieran lo que se supone que tendrían que hacer. Hace 200 años, Adam Smith describió el sistema como aquel que funciona *como si* una mano invisible se encargará de la coordinación».

Considera que los sistemas formados por seres vivos pueden ser una referencia aproximada del tipo de sistemas que nos interesan. Llama nuestra atención sobre la similitud existente entre el comportamiento de las colonias de hormigas y los agentes en el mercado: «La colonia está llena de pautas, regularidades y proporciones equilibradas entre distintas actividades, como

aprovisionamiento, mantenimiento y reparación o exploración. Sin embargo, una hormiga no sabe si hay pocas o muchas hormigas dedicadas a la búsqueda de comida o a la reparación de un daño de la colmena». «Por qué el sistema funciona como lo hace, y de manera tan efectiva, es un problema dinámico de evolución social y genética.» Schelling (1989, p.19). Resolver la incógnita de cómo surge una conducta agregada que genera y describe la sociedad de las hormigas, a partir del limitado conjunto de elecciones que hace cada hormiga, dentro de su pequeño mundo, es una cuestión similar a comprender como en el mercado se crean gran cantidad de bienes destinados a satisfacer las necesidades de los consumidores, cuando en la producción de cada bien participan gran cantidad de agentes que tienen una información muy limitada del entorno. Aunque ello hoy no nos sorprenda. «Cuántos muebles les van a demandar para acondicionar las nuevas viviendas construidas, (...) (es una) cuestión que, por supuesto tampoco saben los productores de madera. Pero sin embargo todos los años se venden millones de muebles de multitud de estilos y fabricados con maderas muy diversas, (...) por supuesto esos muebles están en el mercado porque los suministradores de maderas han conseguido proporcionar estos inputs a las empresas fabricantes. Pero cada oferente particular de madera no conoce como se distribuyen los gustos de los consumidores.», Shelling (1989).

Aunque existan similitudes destacables entre el comportamiento de sistemas como las colonias de hormigas y la economía, es necesario destacar que existe una diferencia fundamental entre ambos tipos de sistemas. En el caso de los mercados, las empresas que lo forman son capaces de extraer información del entorno y utilizarla en beneficio propio. A diferencia de los sistemas vivos como las hormigas, en los mercados, las empresas participantes y los consumidores muestran una conducta deliberada, la conducta está orientada a unos objetivos particulares. «La economía se ocupa fundamentalmente de las transacciones en las cuales todo el que resulta afectado es un participante voluntario» Schelling (1989, p.26). Por otro lado, las decisiones o conductas de un agente tienen efecto sobre las decisiones de otros, se trata pues de una *conducta dependiente*: «las metas, los propósitos o los objetivos se relacionan directamente con otras personas y su conducta, o están restringidos por un entorno constituido por otros

individuos que persiguen sus propias metas, sus propósitos o sus objetivos. (...) Es precisamente la conducta dependiente donde las decisiones de la gente dependen de la conducta o de las decisiones de otros, la que generalmente provoca la imposibilidad de una simple suma o extrapolación de los agregados. (...) La Economía tiene esta características particular. La gente influye en otra gente y se adapta a otros individuos. Lo que las personas hacen afecta a otras personas.» Schelling (1989, p.25). En estos sistemas existen feedbacks entre los agentes que impide la posibilidad de establecer relaciones causa-efecto entre ciertas variables. Schelling (1989, p.88) muestra un ejemplo al respecto: «ciertas viejas zonas residenciales están deteriorándose; están deteriorándose porque las personas que conservan atractivas sus casas están yéndose; y están yéndose porque el vecindario está deteriorándose porque las personas como ellas están yéndose; y están yéndose porque el vecindario está deteriorándose porque las personas como ellas están yéndose porque el vecindario está deteriorándose.».

Si como hemos considerado, al modificar una empresa su conducta provoca reacciones o cambios en la conducta de otras empresas, esto supone que también el entorno está en continuo cambio. Idea ampliamente desarrollada por Kauffman al declarar *nuestra incapacidad para establecer el espacio de configuraciones*, en los sistemas que son resultado de un proceso de autoorganización basado en la co-evolución de los diferentes agentes.

Aunque es cierto que existen importantes diferencias cualitativas en las conductas que guían a los agentes económicos que aquellas que caracterizan a los sistemas vivos como las colonias de hormigas, es importante, a esta altura, recordar cuales son sus similitudes: en ambos sistemas emergen comportamientos observables en el macronivel que se derivan de la interacción entre los agentes que actúan localmente, incapaces de captar el sistema como un todo, y por tanto de conocer el comportamiento del agregado.

### ***7.3.1. El modelo de segregación de Schelling***

En 1971, Thomas C. Schelling, publica un artículo titulado “*Dynamics Models of Segregación*”, desarrolla un modelo espacial en el que la población se

localiza a lo largo de una línea, de acuerdo con las preferencias de composición de sus vecinos circundantes. El objetivo de Schelling es demostrar que de estas preferencias locales surge una pauta de localización reconocible a nivel del agregado. Más tarde en 1978 en *Micromotivos y macroconducta* Schelling crea un nuevo modelo basado en una cuadrícula en lugar de una línea, compuesta por celdas en cada una de las cuales se coloca a cada uno de los individuos, que en este caso son de dos clases claramente diferenciables, por ejemplo dos razas. Además, en la cuadrícula existen espacios en blanco que serán utilizados para la relocalización de aquellos individuos que estén insatisfechos. Schelling comienza construyendo un espacio de trece filas y dieciséis columnas, con alrededor de un tercio de espacios en blanco. Supone que los individuos quieren que, al menos, la mitad de sus vecinos sean como ellos. Si distribuimos aleatoriamente individuos de dos razas diferentes en un determinado espacio, y establecemos preferencias sobre la vecindad, algunos de los vecinos querrán relocalizarse (debido a una presencia excesiva de vecinos de otra raza), cuando algunos vecinos se relocalizan se desencadena un proceso en cadena cuyo resultado es un patrón de localización en el espacio segregado.

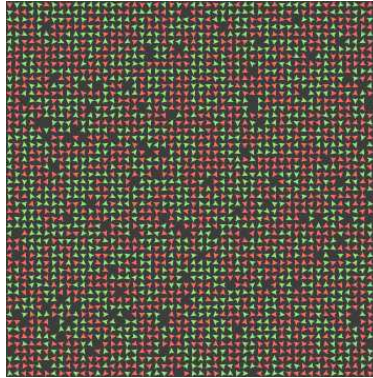
El trabajo muestra como algunas decisiones individuales, -tomadas por los agentes de forma totalmente miope, sin llegar a ningún tipo de acuerdo con otros agentes, sin que existan agentes que se anticipen, ni averigüen la elección de ningún otro-, tienen resultados colectivos que nadie deseaba, o, al menos, nadie o ningún grupo social los tenía en mente antes de que sucedieran. El modelo de segregación es un ejemplo de sistemas en los que operan mecanismos que generan resultados colectivos a partir de conductas individuales no organizadas.

La aportación más importante del modelo de Schelling es mostrar que aunque los agentes no deseen vivir en grupos separados, los barrios que forman con sus interacciones acaban segregándose. Ninguno de los agentes tiene un conocimiento global ni puede anticipar las consecuencias de sus decisiones agregadas: se limitan a mirar a su alrededor, a ponderar si sus vecinos son lo suficientemente iguales a ellos mismos, a decidir si eso les satisface, y a quedarse o moverse en consecuencia. Curiosamente, cuando los individuos son demasiado

exigentes, y buscan un vecindario exclusivamente de su mismo color, el modelo no alcanza un equilibrio: su exigencia les fuerza a estar en peregrinación constante.

**Distribución inicial**

Nº de vecinos: 2500



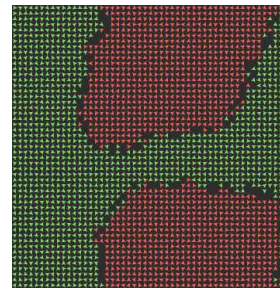
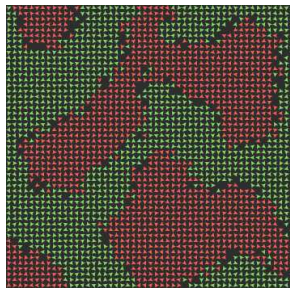
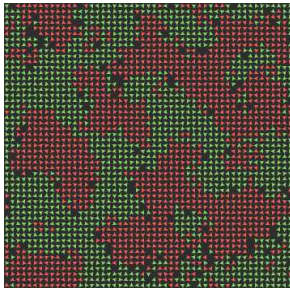
**1. Porcentaje de similitud deseado por los agentes 70%**

Tiempo transcurrido:

25 pasos

84 pasos

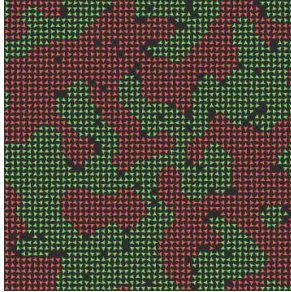
660 pasos



Similaridad alcanzada: 97,7%

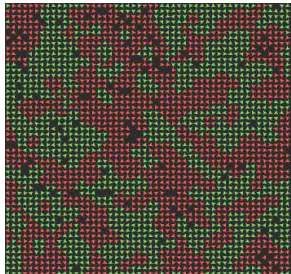
**2. Porcentaje de similaridad deseado por los agentes: 50%**

Tiempo transcurrido: 32 pasos



Similaridad alcanzada: 87.3%  
Porcentaje de insatisfacción: 0

**3. Porcentaje de similaridad deseado por los agentes: 30%.**



Similaridad alcanzada: 75,2  
Porcentaje de insatisfacción: 0

Fuente: Elaboración propia a partir de Wilensky, U. (1998), *NetLogo Segregation model*, *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*. [ccl.northwestern.edu/netlogo/](http://ccl.northwestern.edu/netlogo/).

***Figura 7.1. Modelo de segregación de Schelling***

La figura 7.1. muestra los resultados obtenidos por el programa de simulación Netlogo. El modelo parte de una distribución aleatoria de las localizaciones y de un parámetro que determina las preferencias de vecindad, en el caso en el que el parámetro sea un 50% los habitantes preferirán localizarse en

vecindarios en los que exista una distribución regular o proporcionada de habitantes de las dos distintas razas. Si en su localización actual algún ciudadano tiene una vecindad con una similaridad inferior al 50%, existe más proporción de alguna de las dos razas, y en ese caso el agente decidirá relocalizarse. Cuando establecemos en el programa un valor para el porcentaje de similaridad del 70% el espacio se acaba mostrando muy segregado, se divide en prácticamente dos partes, en cada una de ellas se concentran los habitantes de cada raza o tipo. Sin embargo el sistema no alcanza una situación de reposo, siempre hay una pequeña cantidad de agentes insatisfechos desplazándose de unos lugares a otros. Puede también observarse que en todos los casos considerados el nivel de similaridad que se alcanza es muy superior al deseado por los agentes.

Partiendo de una distribución aleatoria de las localizaciones y estableciendo un porcentaje de similaridad del 50% el sistema alcanza su equilibrio (no hay individuos que quieran relocalizarse) a los 32 pasos, con una similaridad del 87,3%. El modelo de Schelling no nos dice simplemente que cuando los individuos prefieren localizarse con personas de su misma raza se va a producir una segregación, también nos muestra que en el caso en que los individuos sean mas o menos tolerantes para aceptar un modelo integrado también se generarán patrones más o menos segregados.

Schelling en su modelo presenta un simple pero profundo ejemplo de cómo se produce autoorganización en el espacio resultado de las interacciones entre los elementos del sistema, en este caso entre los habitantes de un área urbana. Aunque la idea básica pueda sonar trivial: la segregación se produce cuando la gente prefiere no tener demasiados vecinos diferentes a uno mismo, Schelling supo resaltar y hacernos ver otros puntos menos obvios como el hecho de que ciertas preferencias sutiles sobre el color o cultura de los vecinos nos puede conducir a un elevado grado de segregación, a pesar de que estas preferencias sean muy locales (los individuos solo se preocupan de sus vecinos más inmediatos). Esta tendencia a la segregación se debe a la conducta dependiente de los agentes.

La simulación de Schelling no sólo exhibe la disparidad entre micro-motivos y macrocomportamiento; también explica el por qué de esa discrepancia: las redes de interacción e interdependencia que vinculan a los agentes generan dinámicas no lineales que acaban transformándose en esos patrones de segregación. Cuando un individuo decide dejar un barrio, su decisión no sólo le afecta a él, también afecta al resto del vecindario: su marcha puede haber truncado las expectativas de otros agentes que, en consecuencia, también deciden marcharse. Y de esa no linealidad surge lo inesperado, lo no previsto, las consecuencias no intencionadas de la acción.

Además del modelo de segregación de Schelling existen otros dos modelos más recientes de procesos de autoorganización en Economía: uno llamado *orden producto de la inestabilidad* que se aplica a la formación de las “edge cities” en la ciudad de Los Angeles, y el otro llamado *orden producto del crecimiento aleatorio*.

### **7.3.2. La formación de las edge cities un ejemplo de orden producto de la inestabilidad.**

Krugman puede considerarse como una de las figuras más representativas, que en tiempos más recientes se han orientado a la interpretación de procesos de autoorganización en economía desde un enfoque transdisciplinar. Aplica planteamientos de la autoorganización desarrollados por otras ramas de la ciencia como metáforas o ideas que ayuden a comprender los procesos autoorganizados en la economía. Su libro *Self-organizing Economy*, publicado en 1996 tiene como objetivo mostrarnos evidencias acerca del carácter autoorganizado de la economía y por ende de los fenómenos y procesos económicos. Propone dos procesos de autoorganización universales denominados, uno *orden producto de la inestabilidad* y el otro *orden producto del crecimiento aleatorio*. Estos procesos generan autoorganización en muchos fenómenos, por ejemplo los huracanes en el primer caso y los terremotos en el segundo. La presencia de fenómenos interpretables a partir de estos procesos no implica en ningún caso que dichos procesos sean los únicos que generen autoorganización.



A Krugman le llamó la atención la estructura, en cierta forma, “descentralizada” de la ciudad de Los Angeles con varios centros o distritos de negocios separados con cierta regularidad. Le incomodaba la incapacidad de los modelos teóricos de economía urbana para explicar esta descentralización y llegó a la conclusión de que la estructura observada es el resultado de un proceso de autoorganización que él denomina *orden producto de la inestabilidad*. Su modelo trata de mostrar como a partir de una distribución inicial de una industria casi plana, aunque aleatoriamente perturbada, el modelo evoluciona hacia una estructura en la que toda la industria se concentra en varias aglomeraciones, en su modelo inicial exclusivamente en dos regiones. En este ejemplo, las dos regiones “ganadoras” se sitúan justamente una enfrente de la otra, regularidad que queda garantizada siempre y cuando la distribución inicial de la industria (del conjunto de empresas) sea lo suficientemente plana. Este modelo refleja como de la aleatoriedad surge el orden, un orden que, curiosamente parece tanto más predecible cuanto menor estructura haya en las condiciones iniciales, Fujita et al (2000 p. 90).

El mecanismo o proceso capaz de explicar las pautas de localización de las actividades es, a juicio de Krugman, similar al problema planteado por Turing (1952) sobre la morfogénesis celular. El trabajo central de Turing partía de un embrión simplificado consistente en un anillo de células; Krugman directamente inspirado en él, considera una ciudad unidimensional e infinita o circular. Para el autor esta consideración no tiene más valor que la de ilustrar fácilmente la cuestión. El modelo afirma que las empresas quieren estar unas próximas a otras porque existen probablemente más clientes y oferentes disponibles en las localizaciones con más población, pero a su vez también querrán estar alejadas unas de otras para reducir la competencia frente a los inputs y los clientes. Estas dos comportamientos serán denominados por Krugman fuerzas de atracción y repulsión respectivamente –también reciben el nombre de fuerzas centrípetas y centrífugas– para que el modelo funcione estas fuerzas no pueden contrarrestarse totalmente unas a otras, las fuerzas de atracción actúan sobre un rango más corto que las fuerzas de repulsión. Dada cualquier distribución aleatoria de empresas estas dos propiedades generan una estructura que se autoorganizará en una serie

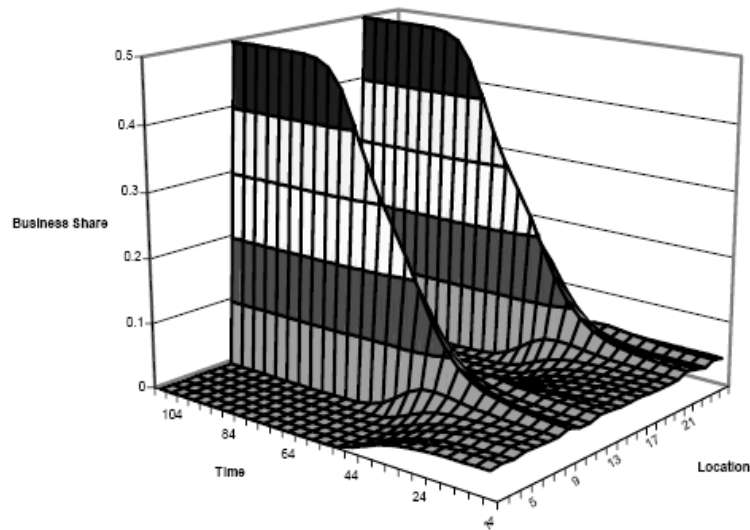
de centros de negocios o actividad regularmente distribuidos. Surge un *orden producto de la inestabilidad* pues dada una distribución uniforme de empresas éstas se autoorganizarán en una estructura espacial de nubes o centros de similares tamaños.

El modelo de Turing centra su atención en las fases iniciales del proceso dinámico, afirmando que para comprender los procesos de morfogénesis es importante centrarse en el inicio del proceso de diferenciación cuando se rompe la simetría inicial entre células. En el caso que ahora nos ocupa, el de la formación de aglomeraciones urbanas, significa centrar la atención en las primeras etapas del proceso representado en la figura 7.2 (p.190), es decir, en el momento que se produce la divergencia inicial de la economía respecto a la tierra plana. El modelo tiene una conducta muy sencilla, supone que cualquier desviación real de la industria con respecto a su valor de la tierra plana se puede describir como una fluctuación sinusoidal que recorre el círculo un número entero de veces, lo que determina su frecuencia. Existirán diferentes frecuencias, algunas de las cuales tenderán a desaparecer –manteniendo un equilibrio estable en la tierra plana– pero otras se impondrán de manera que permanecerá aquella frecuencia que sea más inestable pues llegará a dominar a las otras, dando lugar al patrón de aglomeraciones que se desarrolla en la economía, Fujita et al (2000)

La figura 7.2. empezó a representarse aplicando perturbaciones aleatorias y dejando que la economía evolucionara, teniendo en cuenta que las ubicaciones óptimas elegidas por cada empresa para fijar la producción dependen del lugar escogido por el resto de productores<sup>40</sup>. De la aleatoriedad se llegó a una estructura extremadamente regular, el modelo puede extensificarse introduciendo la posibilidad de que se generen más aglomeraciones

---

40. La tasa de variación de la industria en la localización  $r$  depende de la concentración de la industria en el resto de localizaciones, teniendo en cuenta que el impacto de la industria en otras localizaciones,  $r+\theta$  depende de la distancia entre esas dos localizaciones  $\theta$  de acuerdo con la función  $k(\theta)$ .



La gráfica representa la localización en el eje horizontal (de izquierda a derecha). La cuota de mercado alcanzada por cada localización en el eje vertical. El tiempo también representado en el eje de las equis crece de derecha a izquierda.

Fuente: Fujita et al (2000)

*Figura 7.2. Imagen de los resultados de Krugman. Un modelo sobre localización espacial de las actividades económicas.*

### 7.3.3. El orden producto del crecimiento aleatorio

Krugman (1996, 1997, p.61) interesado en la ley de Zipf para la distribución del tamaño de las ciudades y conocedor de los fenómenos en que estas distribuciones aparecen, afirma que estos resultados parecen surgir cuando se cumplen dos requisitos: en primer lugar, los objetos de estudio están sujetos a un crecimiento considerable a lo largo del tiempo, y en segundo lugar, la tasa de crecimiento de cada objeto individual es aleatoria, de modo que con el transcurso del tiempo se llega a obtener un amplio abanico de dimensiones varias. Hoy parece que podemos afirmar que las leyes potenciales son una emergencia que se

da en procesos de crecimiento donde la tasa esperada de crecimiento es independientemente de cual sea el tamaño ya alcanzado.

Krugman considera que actualmente el modelo que mejor explica la aparición de distribuciones de ley potencial en economía es el modelo de Simon (1955) y Simon y Bonini (1958). Como vimos estos trabajos intentan derivar a partir de procesos estocásticos distribuciones asimétricas, con conducta potencial. Descubren que surgen en sistemas formados por elementos caracterizados por un importante crecimiento y donde la tasa de crecimiento es independiente del tamaño alcanzado por cada elemento del sistema. Simon (1955) aplica su modelo a la frecuencia de aparición de las palabras en el texto, las ciudades, las especies biológicas y años más tarde en Simon y Bonini (1958) a la distribución del tamaño de las empresas, (ver capítulo 8).

Simon y Bonini consideran que la existencia de una gran variedad de tamaños de ciudades (o de empresas) es una prueba de que realmente no hay tales equilibrios, o con otras palabras, que el tamaño es más o menos irrelevante. Y es precisamente debido a esta irrelevancia del tamaño que el proceso de crecimiento aleatorio puede originar una enorme variedad de tamaños cuya cola superior está muy bien descrita mediante una ley potencial.

El planteamiento original de Simon de un modelo de crecimiento aleatorio Simon (1955) y Ijiry y Simon (1977) tuvo sorprendentemente un escaso impacto en el pensamiento económico, tal vez debido al nihilismo económico que destila, pero también porque el planteamiento es muy denso. Ofrecemos una versión simplificada.

El modelo descrito de forma más accesible en Fujita et al (2000, p. 217) afirma que la cola superior de la distribución del tamaño de las ciudades está muy bien descrita mediante una relación de la forma  $N = kS^{-\alpha}$  donde  $N$  es el número de ciudades con una población mayor que  $S$ . Por lo tanto, también podemos decir que la *densidad* de los tamaños de las ciudades es  $n = \alpha k S^{-\alpha-1}$  a partir de aquí podemos afirmar que la elasticidad de la densidad de las ciudades con respecto al tamaño es  $-\alpha-1$ .

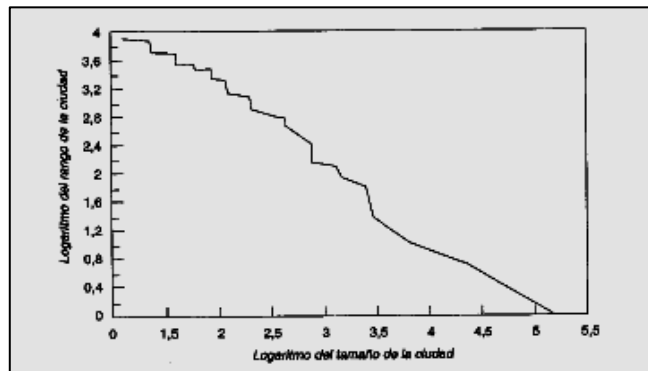
$$\frac{dn}{dS} \frac{S}{n} = -\alpha - 1$$

Suponemos un proceso en el que la población urbana crece con el tiempo de acuerdo con incrementos discretos, que llamaremos “hornadas” dejando que la población de cualquier punto en el tiempo, medida en hornadas sea  $P$  ¿A dónde va a parar una nueva hornada cuando llega? Simon supone que con una determinada probabilidad  $\pi$ , va a una localización previamente despoblada, es decir, crea una nueva ciudad pequeña. Y con una probabilidad  $1-\pi$ , la hornada se une a una ciudad ya existente, además la probabilidad de unirse a una ciudad existente será proporcional a la población inicial de la ciudad. En un desarrollo muy hermético Simon demuestra que el exponente  $\alpha$  de la distribución es igual a  $\frac{1}{1-\pi}$ .

Del modelo se desprende que el tamaño de una ciudad no acarrea ni ventajas ni desventajas: una ciudad no es más que un conjunto de trozos cuya tasa de crecimiento prevista es independiente del tamaño. En principio no parecerían existir muchos motivos para tomarnos dicho modelo en serio, especialmente teniendo en cuenta su falta de contenido económico. Sin embargo, como nos hace recordar Krugman, la distribución del tamaño de las ciudades sigue una ley potencial, y el modelo de Simon predice este resultado además de proporcionar una pista sobre la razón por la cual la distribución del tamaño de las ciudades podría haber permanecido estable a pesar de los enormes cambios en la tecnología y en la estructura económica.

Fujita et al (2000, p.218) realizan una simulación del modelo para  $\pi = 0,2$ . Empezamos con 10 semillas de un trozo (hornada) cada una y dejamos que la población se multiplicara por 100. La figura siguiente muestra la relación rango/tamaño de las 50 unidades más importantes, cuyo logaritmo es razonablemente lineal, y cuya pendiente no se aleja mucho del valor previsto por el modelo.

El modelo de Simon supone una importante ventaja frente a los modelos economicistas, al menos en su mayor coincidencia con la evidencia empírica, pues predice una distribución de ley potencial para el tamaño de las ciudades lo que no hacen los modelos clásicos de economía urbana. Por otro lado, el misterioso exponente 1 que caracteriza muchas distribuciones potenciales, el cual parece difícil de justificar, en este caso tiene una interpretación natural, pues es compatible con una situación, muy normal, en la que los incrementos de población se suman a ciudades existentes y no dan lugar a la creación de nuevas ciudades, caso en que  $\pi = 0$ .



Fuente: Fujita et al (2000, p.218)

***Figura 7.3. Distribución del tamaño de las ciudades originado por el crecimiento aleatorio***

El modelo además de recibir críticas por su escaso contenido económico, plantea un problema adicional. Como muestran los experimentos de simulación, cuando  $\pi$  es muy pequeño necesitamos un gran incremento en la población urbana para dar lugar a una ley potencial. Cuando  $\pi$  es próximo a 0, la distribución tiende a aproximarse hacia un estado estable única y exclusivamente tras un incremento masivo de población. En el caso de que  $\pi$  toma un valor inaceptablemente alto, 0,2; para llegar a una distribución relativamente uniforme,

la población urbana tuvo que multiplicarse por 100. Pero este requisito no parece darse en la realidad. La población urbana de Estados Unidos se ha multiplicado aproximadamente por 50 desde mediados del siglo XIX, aunque ya al menos desde 1890 ha prevalecido una ley potencial sobre el tamaño de las ciudades en este país (en la que el exponente ha estado muy próximo a 1). Además esta norma de clasificación o ley se cumple también para países con mucho menor crecimiento de la población.

Esta limitación puede ser superada si consideramos la flecha del tiempo y la posibilidad de que  $\pi$  cambie con el transcurso de éste. Es razonable pensar que a medida que transcurra el tiempo el valor de  $\pi$  disminuya hasta llegar a ser 0 en nuestros días. En este caso es posible que la ley potencial se alcance con un menor incremento de la población.

Aunque Krugman considera que el modelo de Simon es quizás excesivamente nihilista, es actualmente el modelo más satisfactorio que tenemos para explicar la aparición de leyes potenciales en economía. En el capítulo 8 ampliaremos el análisis de este modelo aplicado a la distribución del tamaño de las empresas, se estudiará con más profundidad, relacionándolo con otros trabajos que también interesados en la aparición de leyes potenciales en otros campos han llegado a similitudes con los planteamientos de Simon.

## **PARTE IV.**

### **BREVE DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

---

«Estas situaciones, en las cuales la conducta o las decisiones de la gente dependen de la conducta o de las decisiones de otros, son las que generalmente no permiten una simple suma o extrapolación de los agregados. Para hacer esa conexión por lo regular tenemos que observar el sistema de interacción que se da entre los individuos y su entorno, es decir, entre unos individuos y otros o entre los individuos y la colectividad. A veces los resultados son sorprendentes y en ocasiones no se deducen fácilmente».

Schelling, T.C. (1978, 1989, p.12)





## **CAPÍTULO 8**

### **DE ZIPF A LOS MODELOS DE AGENTE**

#### **8.1. INTRODUCCIÓN**

Los diversos trabajos que se han encargado de observar el comportamiento de las empresas a partir del estudio de agregados, como un sistema complejo, han evidenciado que existen ciertos “hechos estilizados” en el comportamiento de estos agregados relacionados con las leyes potenciales. Estas aparecen en la distribución de: el tamaño de las empresas, las quiebras, la variación en las tasas de crecimiento o la edad de las empresas.

Desde la aparición de los trabajos de Zipf (1949) muchos investigadores, especialmente durante las dos últimas décadas, se han interesado en la distribución del tamaño de las empresas. En nuestros días esta cuestión es objeto de interés para investigadores procedentes diversas ciencias –como la física, la biología o la teoría de redes– interesados en el estudio de sistemas complejos. A estas alturas del trabajo, después de una revisión de los diferentes desarrollos y teorías que pueden haber sido útiles en la comprensión de la distribución observada en el tamaño de las empresas, se expondrá cuál es hoy el estado de la cuestión y cuales han sido las aportaciones más importantes en la explicación de las distribuciones observadas. Aunque se han realizado importantes avances en la comprensión del fenómeno, no podemos afirmar que la explicación subyacente de la aparición de leyes potenciales, por lo menos en el caso que a nosotros nos ocupa sea un tema superado en la investigación económica. Entonces, llegados a este punto ¿qué sabemos de las leyes potenciales? En las siguientes líneas se intentará ofrecer un retrato, a modo de resumen, del estado de la cuestión.

1. El matemático Mandelbrot, uno de los primeros investigadores interesado directamente en dar una explicación de la frecuente aparición de este tipo de distribuciones, descubrió en ellas una característica fundamental: la autosemejanza estadística. Más tarde, el desarrollo de la geometría fractal – término acuñado por él– evidenció la presencia de las leyes potenciales en el espacio. La evidencia empírica (ver capítulo 3), muestra que el comportamiento fractal es una característica de la distribución del tamaño de las empresas. La distribución se ajusta a leyes potenciales para todo el país, para las diferentes comunidades autónomas, provincias y poblaciones de cierto tamaño.

2. Una línea de investigación, iniciada por Gibrat, se centró en la búsqueda de modelos estocásticos que fuesen capaces de dar una explicación de la asimetría observada. Gibrat demostró que su hipótesis del crecimiento proporcional –la tasa de crecimiento de las empresas es proporcional a su tamaño– reproducía una distribución estable para el tamaño de las empresas que se comportaba como la descrita por Pareto. Simon (1955) propuso un modelo basado en premisas estocásticas y directamente inspirado en Gibrat que también reproduce distribuciones asimétricas. Posteriormente Simon (1958) aplicó su modelo a la distribución del tamaño de las empresas. Aunque, más allá de éste, surgen otros trabajos que han desarrollado modelos estocásticos dedicados a explicar la aparición de leyes potenciales, todos suelen recibir la misma crítica, su falta de contenido económico; pese a ello, el modelo de Simon es considerado hoy como una de las explicaciones más satisfactorias de la aparición de leyes potenciales.

3. La teoría de sistemas, a partir de la segunda década de los 50, supuso un cambio en la forma de observar los problemas, renunciando a los planteamientos reduccionistas y orientándose a analizar la totalidad. Esta teoría aplicada a nuestro objeto de estudio, implica considerar como un sistema al conjunto de empresas que actúan en el mercado. El sistema depende de muchas variables, además sus componentes –en nuestro caso empresas– interaccionan unos con otros produciéndose efectos de retroalimentación, por ello la dinámica que

caracteriza el sistema es no lineal e impredecible. Y es la conducta no lineal la que permite la emergencia de comportamientos (como la distribución del tamaño de las empresas), que no pueden ser explicados a partir del estudio de las partes (cada una de las empresas).

La perspectiva sistémica nos hace percibir con claridad que debemos encontrar una teoría que sea capaz de explicar, a la vez, desde las mismas premisas, por qué existen empresas de gran tamaño y empresas pequeñas. Esta teoría debería dar respuesta a la variedad de tamaños observada en la mayor parte de los mercados y a la aparición de distribuciones de ley potencial.

4. Los planteamientos procedentes de la termodinámica y especialmente los de la Escuela de Bruselas, con Prigogine a la cabeza, son muy útiles para comprender como surge el orden de forma espontánea en los sistemas complejos, en nuestro caso el microsistema formado por todas las empresas que actúan en un determinado espacio. Los descubrimientos de Prigogine demuestran que la organización, la generación de estructura puede surgir espontáneamente cuando los sistemas están alejados del equilibrio. Aunque la termodinámica restringe la autoorganización a la generación de estructuras, sus ideas pueden ser extendidas a otro tipo de sistemas donde el orden no está relacionado con la formación de éstas, sino, con la aparición de macrocomportamientos (pautas estadísticas a nivel del agregado). Como nos enseñó Prigogine, los sistemas vivos o formados por seres vivos se encuentran alejados del equilibrio (termodinámico), están continuamente importando energía (inputs) y expulsando entropía, aumentando el desorden. Es a partir de disipación de energía que el sistema procesa información y genera estructura. Así, las empresas y los sistemas formados por éstas son estructuras disipativas en el lenguaje de Prigogine. Los mercados, o los sistemas formados por empresas, importan inputs del exterior, y en el proceso de asignación de recursos —de disipación— ensayan fórmulas o estrategias, seleccionando unas y rechazando otras. Bajo este enfoque podríamos considerar que los sistemas formados por empresas, al igual que otro tipo de sistemas, disipan energía en forma de ley potencial. En este sentido, la ley de Zipf observada en la distribución del tamaño de las empresas puede ser considerada como una manifestación de que el sistema formado por empresas es un sistema autoorganizado.

La ley es la manifestación de la emergencia espontánea de orden derivada del proceso de disipación.

5. Si nos centramos en el campo de la investigación económica, la hipótesis de orden espontáneo ha estado presente desde sus comienzos, como vimos en el capítulo anterior, Adam Smith utilizó su metáfora de la mano invisible para explicar el funcionamiento de un sistema autoorganizado como mercado. Sin embargo, aunque esta metáfora es conocida por todos, el pensamiento económico no pareció interesarse demasiado por profundizar o dar una explicación de esta idea expuesta por Smith. Gran parte del pensamiento económico posterior influenciado por los planteamientos mecanicistas, paradigma dominante en el mundo científico hasta fechas relativamente recientes, se orientó, desde una perspectiva reduccionista, hacia la búsqueda de relaciones o leyes causales que tratasen de aportar luz sobre el funcionamiento de esa gran “máquina” que es el mercado. Algunos de los que escaparon de esta influencia, como Menger y más tarde Hayek orientaron su trabajo hacia la comprensión del origen de las instituciones sociales y llegaron a la siguiente conclusión: muchas instituciones, como es el caso del mercado, manifiestan un orden que se origina de forma espontánea. Otros como Schelling profundizarán en los procesos de autoorganización en procesos sociales y económicos.

6. Con el tiempo el descubrimiento de nuevos fenómenos que responden a leyes potenciales, es más la ubicuidad de éstas y los hallazgos de la física de los sistemas complejos conducen a la creencia de que dichas las leyes están relacionadas con la emergencia de orden espontáneo en los sistemas. Bak considera que los sistemas se autoorganizan en un estado llamado “crítico” caracterizado por la aparición de leyes potenciales. Como plantea en su metáfora de la pila de arena los sistemas tienden hacia un estado “de equilibrio” –crítico– en el que se producen avalanchas de todos los tamaños. Los sistemas tienden hacia este estado de forma espontánea por lo que reciben el nombre de *críticamente autoorganizados*. Las ideas de Bak presentan similitudes con las de Prigogine: los sistemas descritos por ambos son sistemas, que alejados del equilibrio, alcanzan una situación metaestable en la que la energía se disipa en forma de ley

potencial. Pese a los avances que ha supuesto la física para el estudio de fenómenos que exhiben autoorganización y distribuciones de ley potencial, actualmente no puede afirmarse que desde esta perspectiva hayan emergido explicaciones convincentes de la abundancia de fenómenos que responden a este tipo de comportamiento. Por otro lado, el hecho de que los sistemas complejos en física estén formados por seres inertes, incapaces de tomar decisiones, supone una limitación muy importante para la aplicación de este tipo de modelos al estudio de fenómenos económicos. Para esta investigación nos quedamos con las ideas de Bak y su tesis de que los sistemas formados por muchos agentes tienden a autoorganizarse, a alcanzar un equilibrio metaestable caracterizado por la aparición de leyes potenciales; sin embargo, las explicaciones subyacentes de la aparición de estas leyes en la distribución del tamaño de las empresas deberemos buscarlas desde los conocimientos que nos aporta nuestro propio campo de estudio.

7. La biología también ha descubierto que los grandes sistemas formados por seres vivos son autoorganizados y que la aparición de leyes potenciales es común en esta ciencia. Kauffman apoya la hipótesis de Bak al afirmar que las distribuciones de ley potencial en grandes sistemas como las biosferas son una característica emergente de la autoorganización de grandes sistemas como las biosferas y “econosferas”. Afirma que las biosferas tienden a autoorganizarse en un estado caracterizado por la aparición de leyes potenciales en los eventos de extinción, de especiación, y en la edad de los agentes biológicos. Además, Kauffman manifiesta, explícitamente, que la autoorganización en economía y en biología tiene importantes puntos en común: ambas, biosfera y econosfera son autoconstruidas sobre la base de las ventajas derivadas del intercambio entre los agentes del sistema.

8. Otra de las áreas de investigación que, en los últimos años, se ha dedicado a estudiar la aparición de leyes potenciales ha sido el estudio de redes. Los avances tecnológicos de las últimas décadas han permitido conocer, sólo recientemente, la topología de grandes redes complejas. Barabasi y Albert (1999) descubren que ciertas grandes redes y concretamente la Word Wide Web son

libres de escala, nombre –importado de la física estadística– que reciben aquellas redes donde el número de enlaces de los distintos nodos tiene una distribución de ley potencial. La teoría de redes ha descubierto que esta estructura “libre de escala” es una forma muy común que tienen las grandes redes que se organizan de forma espontánea, estudiando las razones del por qué de su emergencia.

Así pues, podemos concluir que, en la actualidad, las leyes potenciales observadas en gran cantidad de sistemas reales son consideradas una manifestación de la autoorganización de los sistemas. La universalidad de estas leyes ha llevado a pensar en la posibilidad de que explicar su emergencia a partir de conductas o modelos relativamente simples. En ningún caso se considera que los sistemas en los que emergen estas características sean simples, sino que se contempla la posibilidad de que los rasgos característicos o particulares de cada sistema puedan quedar borrados y en este sentido no sean necesarios para explicar la dinámica de éste.

Aunque la teoría de los sistemas complejos y su visión interdisciplinar ha permitido un mayor conocimiento de estas leyes y la traslación de conceptos y descubrimientos de unos campos a otros, hoy se considera que no podemos explicar la emergencia de leyes potenciales para todos los sistemas de forma generalizada. Cada proceso de autoorganización deberá ser explicado con las herramientas y los conceptos propios de cada disciplina. Por ejemplo, la metáfora de la pila de arena de Bak es un buena idea de cómo funcionan los sistemas autoorganizados, no sólo en física sino también en otros campos; pero las posibles explicaciones del fenómeno –el comportamiento de los granos de arena en este caso– no puede ser extrapolado al estudio de sistemas como la economía, con agentes altamente heterogéneos y complejos, con capacidad de decisión, de reacción ante situaciones del entorno.

## **8.2. EL ORDEN PRODUCTO DEL CRECIMIENTO ALEATORIO Y EL MODELO DE SIMON**

Aunque existen muchas sombras acerca de los procesos o mecanismos subyacentes que pueden dar lugar a la aparición de leyes potenciales, la investigación ha realizado algunos avances al respecto. Hoy parece que entre las explicaciones plausibles se encuentran aquellas que hacen referencia a comportamientos sobre el crecimiento de los agentes en el sistema. Llegando a la conclusión de que las distribuciones de ley potencial pueden surgir en aquellos sistemas sometidos a crecimiento (relativamente importante) en los cuales el tamaño inicial de los agentes participantes no es determinante, o con otras palabras, el tamaño de los agentes no importa. Esta idea tuvo su germen en la ya referida aportación de Gibrat (1931) y la hipótesis del crecimiento proporcional, ya analizada en el capítulo 1.

Simon en su trabajo, inicialmente publicado en 1955, y referido en el capítulo anterior, directamente inspirado en Gibrat, trata de encontrar un modelo que sea capaz de reproducir el comportamiento asimétrico pero a partir de unas premisas que tengan sentido económico, pues la hipótesis del crecimiento proporcional, tal y como la definía Gibrat, era incompatible con la realidad económica observada, no parece tener sentido considerar que el crecimiento esperado de una empresa para el periodo próximo es proporcional al tamaño alcanzado por la empresa en el momento actual. Simon modifica esta premisa y la redefine de forma débil, de manera que pueda tener una explicación consistente para la economía. La frecuente aparición de fenómenos que se distribuyen como leyes potenciales le lleva a conjeturar que los sistemas en los que éstas aparecen, deben tener alguna propiedad común en la estructura de los mecanismos de probabilidad subyacentes.

El modelo de Simon original –de 1955–, es un modelo estocástico, con carácter general, y con el objetivo de explicar la aparición de distribuciones asimétricas. Inicialmente se aplica al uso del lenguaje, concretamente a la frecuencia de aparición de las palabras, es de suponer que directamente



influenciado por el trabajo de Zipf. El modelo se basa en dos premisas: de alguna manera existe crecimiento proporcional y la población o el sistema está sometido a un continuo crecimiento. Como sabemos en 1958 Simon junto a Bonini aplica su modelo a la distribución del tamaño de las empresas. Para superar el inconveniente de la falta de sentido económico que tiene considerar un crecimiento proporcional para cada empresa reformula la hipótesis de Gibrat<sup>41</sup>: partiendo de la población de empresas, las agrupa en clases de tamaño y establece una misma distribución de probabilidad para las tasas de crecimiento en cada una de las clases. Además introduce proporcionalidad en el crecimiento puesto que el crecimiento de cada clase es proporcional a su tamaño. La segunda premisa establece una probabilidad fija para la aparición de nuevas empresas. Este modelo también genera distribuciones de ley potencial.

Simon nos dice que su modelo parte de la premisa de que *el tamaño no tiene efecto en el porcentaje esperado de crecimiento para una empresa* y a partir de aquí deduce que cuando un sistema lo sometamos a un importante crecimiento y el tamaño no proporcione ventajas en el crecimiento, entonces el fenómeno acaba distribuyéndose de acuerdo a una ley potencial. Como Ijiry y Simon (1977) advierten: existen muchos procesos compatibles con este comportamiento y capaces de reproducir estas distribuciones. Simon afirma que la tasa de crecimiento no depende del tamaño y concluye que es precisamente debido a la irrelevancia del tamaño por lo que el proceso de crecimiento aleatorio origina una gran variedad de tamaños y una distribución conforme a una ley potencial.

Como ya hemos visto, desde la complejidad, la ley potencial observada en la distribución del tamaño de las empresas es considerada como un macro-comportamiento que emerge de un proceso de autoorganización. Actualmente se considera que ese macrocomportamiento es característico de sistemas sometidos a un crecimiento aleatorio como el descrito por Simon y Krugman (1997) que se

---

<sup>41</sup> La hipótesis del efecto proporcional de Gibrat tal y como él la define:  $X_t = \lambda X_{t-1}$ , además de no ser acorde con la evidencia empírica conduce a una distribución asimétrica con un crecimiento en la varianza infinito,

refiere a estos procesos como *orden producto del crecimiento aleatorio*. Ahora, es necesario tener en cuenta que Simon nos advierte que estos procesos son compatibles con muchos tipos de dinámica lo que quizás explicaría la frecuente aparición de fenómenos que se ajustan a este tipo de distribuciones.

### **8.3. ORDEN EN GRANDES REDES**

El análisis de redes es otra de las áreas de investigación que también se ha interesado en la aparición de leyes potenciales, (ver capítulo 5). Los avances tecnológicos han permitido conocer sólo recientemente la topología de grandes redes complejas y al igual que ocurre con la distribución del tamaño de las empresas -donde existe un número pequeño de grandes empresas frente a gran cantidad de empresas con una facturación relativamente muy pequeña- en la World Wide Web sólo unos pocos nodos presentan gran cantidad de enlaces, mientras que la gran mayoría de ellos mantienen pocas conexiones. Para Barabasi y Albert (1999, p.509) la distribución observada de la conectividad de los nodos en la red es una manifestación de que las grandes redes complejas como la w.w.w. se autoorganizan en una estructura libre de escala.

Como ya vimos Barabasi y Albert (1999) crean un modelo en el que las redes libres de escala pueden simularse a partir de la adopción de dos supuestos: primero, que la red está continuamente en crecimiento y segundo, que existe enlace preferencial. Esta última premisa supone que la probabilidad de que un nuevo nodo o vértice se enlace con otro existente depende del número de enlaces previos que ya tenía ese nodo, con otras palabras, los nuevos nodos del sistema prefieren conectarse con aquellos nodos que ya están bien conectados a la red. La probabilidad de que un nodo alcance una nueva conexión es proporcional a la cuota de mercado -share- que haya alcanzado. Por lo tanto el enlace preferencial del modelo de Barabasi mantiene importantes similitudes con el crecimiento proporcional de Gibrat.

La primera premisa del modelo de Barabasi y Albert (1999) establece que la red está en continuo crecimiento. Comienza con un pequeño número ( $m_0$ ) de

nodos, de manera que, a lo largo del tiempo, se van incorporando nuevos nodos de forma continua enlazándose con los ya existentes en la red. Para incorporar el enlace preferencial, se asume que la probabilidad de que un nuevo vértice sea conectado con otro  $i$  depende de la conectividad  $k_i$  de cada vértice de manera que

la probabilidad de estar conectado se expresa como  $\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ . Después de

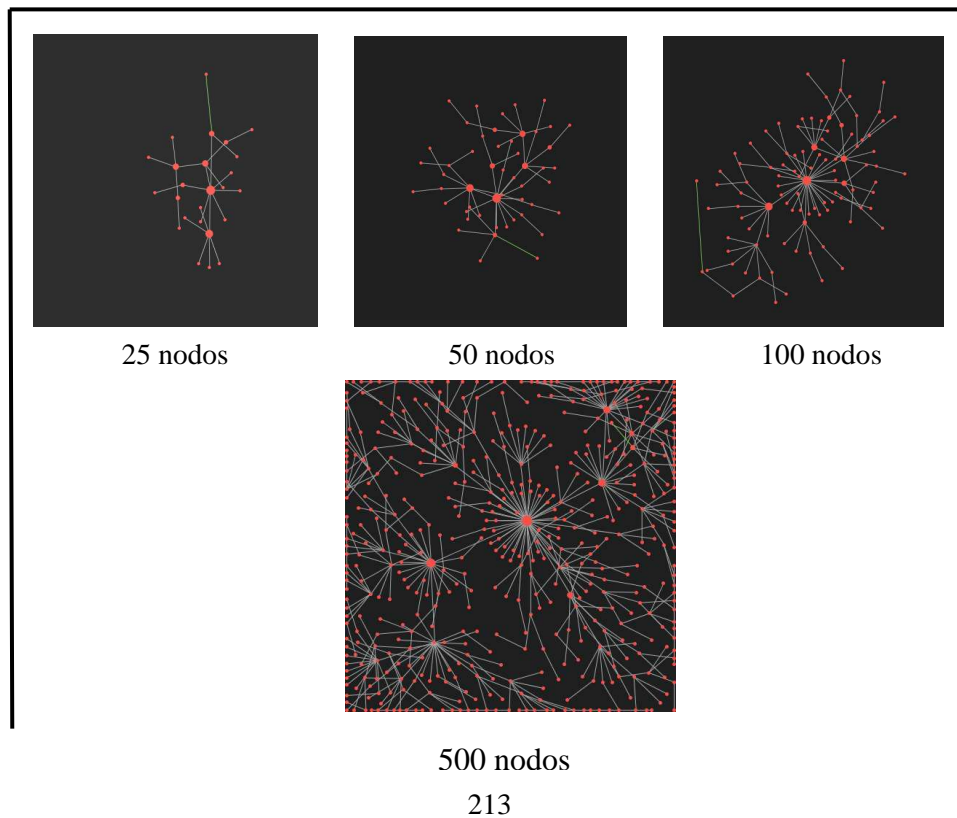
$t$  periodos de tiempo, el modelo es una red con  $t+m_0$  nodos y  $m_t$  enlaces donde la distribución de probabilidad de los distintos nodos de la red sigue una ley potencial. Este modelo, además, muestra una característica muy importante: los principales rasgos estructurales de la red son independientes del tiempo, aunque la red esté continuamente creciendo el sistema se autoorganiza en un estado estacionario libre de escala.

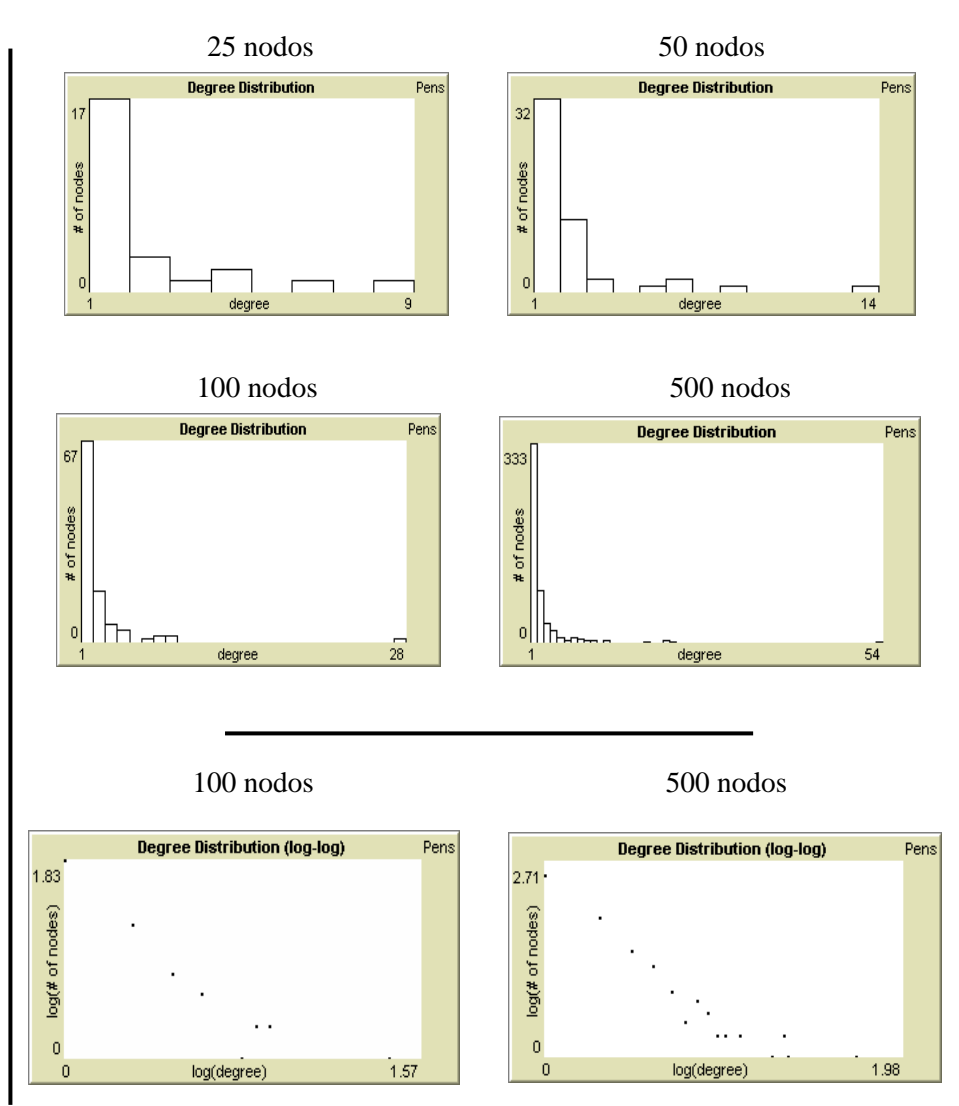
Como demuestran Barabasi y Albert los dos ingredientes de este modelo – el crecimiento y el enlace preferencial– son importantes, si se elimina alguno de ellos la red deja de presentar esta estructura. En primer lugar, si se elimina el enlace preferencial considerando que cualquier nodo se conecta con otro con igual probabilidad – $\Pi(k_i) = \text{constante}$ –, entonces se forma una red donde la distribución de probabilidad de los enlaces se ajusta a una distribución exponencial, no libre de escala. En segundo lugar, si consideremos que la red no crece y que partimos inicialmente de  $N$  nodos; a medida que el tiempo pase y que aumente el número de enlaces, la distribución no alcanza un estado estacionario. Llega un momento que todos los nodos de la red forman un todo conectado.

La primera premisa del modelo de Barabasi el crecimiento continuo de la red, es una característica que presentan muchas redes reales como la investigación científica, las páginas web o la economía, todas ellas están en continuo crecimiento. La segunda premisa, el enlace preferencial, parece jugar un importante papel en la forma de la red alcanzada, al igual que el efecto proporcional del modelo de Simon.

El programa Netlogo permite simular la creación de redes libres de escala a partir de las premisas establecidas por Barabasi y Albert (1999). La figura 8.1. muestra distintos momentos de la red, a medida que se incorporan nuevos nodos a cada paso. Con el tiempo la distribución de la conectividad de los nodos se ajusta a una ley potencial.

El descubrimiento de diversas grandes redes libres de escala, donde el orden surge de forma espontánea, ha conducido a profundizar en su topología. Albert et al (2000) en su estudio de la topología de la w.w.w. descubren tres características relevantes, ya descritas al final del capítulo 5: en primer lugar estas redes presentan una alta tolerancia a los errores –o fallos- de manera que la red es muy robusta; en segundo lugar, es muy vulnerable a ataques selectivos, si falla uno de los nodos altamente conectados se produce un efecto catastrófico en la red; y en tercer lugar, el nivel de conectividad del agregado es más eficiente en este tipo de redes que en aquellas de topología más homogénea.





Fuente: *Netlogo. Preferential Attachment model*. Wilensky, U. (2005).

**Figura 8.1. El modelo de enlace preferencial de Barabasi y Albert**

Como en muchos sistemas complejos que exhiben un sorprendente grado de tolerancia frente a errores, en las redes complejas de comunicación los fallos

locales, raramente, conducen a la pérdida de la capacidad o habilidad de conducir la información en la red.

En estas redes la conectividad se mide por el número medio de nodos que necesitaríamos cruzar para conectar un par cualquiera de la red. Si eliminamos algunos nodos se incrementará la distancia para conectar varios de los nodos restantes, puesto que pueden ser eliminados algunos caminos que contribuían a la conectividad. En las redes exponenciales –aquellas que tienen una escala de conectividad determinada– el diámetro crece monótonamente con el número de fracasos, a medida que eliminamos nodos, es cada vez más difícil la comunicación entre aquellos otros nodos que aún quedan en la red. En contraste, en las redes libres de escala –cuya conectividad se distribuye de forma potencial– cuando incrementamos el número de nodos que fallan, el diámetro de la red<sup>42</sup> parece no cambiar. Incluso cuando la fracción de nodos eliminada es superior al 5%, la comunicación de la red no parece afectada. Esta conducta enraíza en el carácter no homogéneo de la red. Si todos los nodos tuviesen aproximadamente el mismo número de enlaces, todos ellos contribuirían de forma similar al diámetro de la red, y la destrucción de cada nodo adicional provocaría la misma cantidad de daño. Pero en las redes libres de escala, la mayoría de los nodos tienen sólo unos pocos enlaces, los nodos con baja conectividad serán seleccionados con mucha mayor probabilidad, y la eliminación de estos “pequeños” nodos no alterará la estructura de los caminos o pautas de conexión, no tendrá impacto sobre la topología de la red en su conjunto. Esta topología permite fallar sin desgastar la estructura.

Pero, la tolerancia a los errores tiene un alto precio: su extrema vulnerabilidad a ataques selectivos. Si la red es atacada en uno de los nodos de alta conectividad puede producir hechos catastróficos. Barabasi y Albert (1999) simulan un ataque eliminando los nodos en orden decreciente a su conectividad “k” de manera que primero se eliminan los más conectados. En las redes exponenciales bajo ataque, debido a la homogeneidad de la red, no hay una diferencia entre si los nodos son seleccionados aleatoriamente o si son seleccionados en orden decreciente de conectividad. La conducta observada en las

---

42 Entendido como la distancia máxima entre dos nodos de la red.

redes libres de escala, es drásticamente diferente: cuando los nodos más conectados son eliminados, el diámetro de estas redes crece rápidamente doblando su valor original si el 5% de los nodos son alterados. Esta vulnerabilidad a los ataques se debe a la no homogeneidad de la red: la conectividad es asegurada por unos pocos nodos altamente conectados, una eliminación de estos, altera drásticamente la topología, y disminuye la habilidad de comunicarse de los nodos que aún permanecen.

Para una mejor comprensión de cómo se comportan las redes libres de escala ante fallos, es decir, del efecto que produce el impacto de errores y ataques selectivos en su estructura, parece interesante investigar como se produce el proceso de fragmentación o destrucción de la red a raíz de la producción de ataques o fallos, para ello resulta debemos observar que ocurre con la aglomeración de mayor tamaño. La respuesta de las redes libres de escala ante ataques selectivos y fallos aleatorios es muy diferente.

Para los fallos aleatorios, no se observa un umbral de fragmentación, sólo se ve que el tamaño del agregado más grande disminuye lentamente. La red no se rompe en agregados más pequeños, no se desinfla, sino que el incremento de los errores conduce a una disminución lenta en el tamaño del agregado de mayor tamaño y a un incremento del número de nodos desconectados. Este comportamiento, de las redes libres de escala, contrasta con la fragmentación catastrófica que se produce en las redes exponenciales, lo que proporciona evidencia acerca de la superioridad de las redes libres de escala, para enfrentarse a fallos aleatorios, frente a otro tipo de redes (ver figura 8.2.).

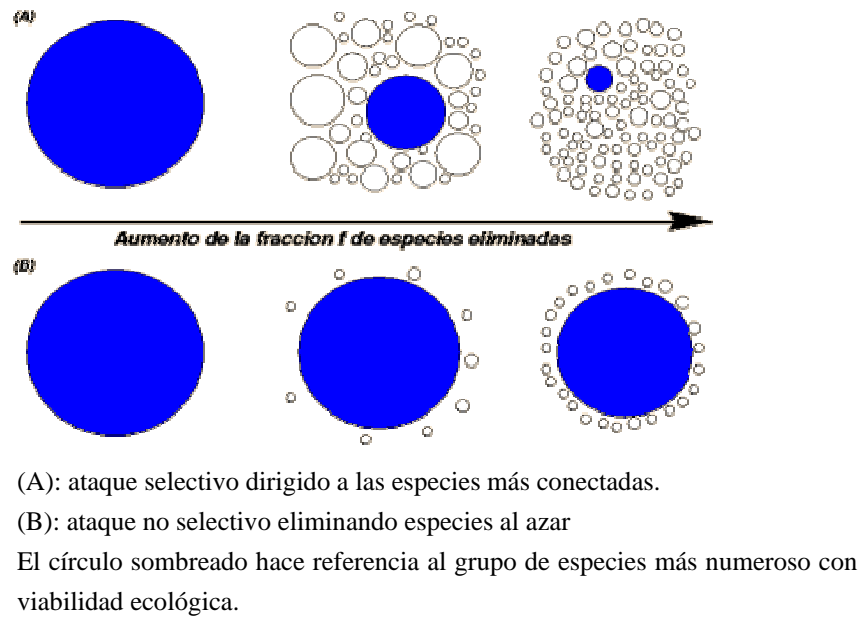
Podemos afirmar que el desarrollo de la investigación en redes complejas ha proporcionado una nueva perspectiva para el estudio de la aparición de leyes potenciales en la distribución de tamaño de las empresas, Watts y Strogatz (1998), Albert et al (1999) y Albert y Barabasi (2002); el enfoque de redes nos proporciona una herramienta universal para la investigación en sistemas complejos, Amaral et al (2004). Actualmente, cualquier sistema complejo basado en la interactividad de los componentes puede ser descrito desde el enfoque de redes, donde los componentes son representados por vértices y las interacciones

por los “enlaces”. Las redes estudiadas por Barabasi y sus colaboradores presentan en su topología una característica común a nuestro objeto de estudio: una ley potencial en la distribución de los componentes. Para las redes de Barabasi y Albert (1999) dicho comportamiento potencial está en la conectividad de los enlaces, y para nuestro objeto de estudio en la distribución del tamaño de los agentes (empresas) que participan en el sistema.

En esta línea, Dahui et al (2005) construyen una red “bipartita” productor-consumidor para describir la estructura industrial. Los “enlaces” de los consumidores a los productores representan las elecciones de los consumidores en cuanto a productos finales. La probabilidad de que un productor sea elegido por un consumidor o sea capaz de atrapar una unidad de consumo viene determinado por su competitividad descrita por su atractivo inicial y por el mecanismo de auto-reforzamiento en la competencia descrita por el enlace preferencial.

Los modelos estocásticos, inspirados en Gibrat y cuyo máximo ejemplo son los trabajos de Simon y su grupo de colaboradores, sabemos que reproducen distribuciones de ley potencial, sin embargo estos modelos no proporcionan explicaciones subyacentes del fenómeno y, en cierta forma, lo mismo ocurre con el modelo de redes de Barabasi y sus colaboradores. Simon nos indica que el crecimiento aleatorio -donde el tamaño no parece relevante- es capaz de explicar estas distribuciones; Barabasi afirma que es el enlace preferencial el que da lugar a la aparición de redes en las que la conectividad se ajusta a una ley potencial. Pero, para poder encontrar explicaciones, mínimamente, satisfactorias del fenómeno, debemos desarrollar modelos que generen la emergencia de las distribuciones deseadas a partir de la conducta de los agentes que forman el sistema. Los modelos de agente desarrollado en el siguiente apartado permitirán superar esta limitación.





Fuente: Montoya et al (2001)

**Figura 8.2. Fragmentación de una red ecológica con topología de mundo-pequeño y distribución potencial de las conexiones.**

#### 8.4. MODELOS DE AGENTE

En este trabajo se considera que la simulación y más concretamente los modelos de agente, también llamados modelos de sistemas multi-agente, son, hoy, la herramienta metodológica más adecuada para seguir avanzando en la comprensión de nuestro objeto de estudio. En este apartado trataremos de proporcionar una visión clara de los fundamentos de esta herramienta y de cómo debemos aplicarla. Además se mostrará cuales han sido los resultados de un trabajo que a partir de esta metodología trata de dar explicación a la ley potencial observada en la distribución del tamaño de las empresas. En fin, este apartado, tiene como objeto plantear los fundamentos metodológicos de la futura línea de investigación.

#### ***8.4.1. La simulación como herramienta metodológica en el estudio de los fenómenos sociales***

Los primeros ejemplos sobre simulación aplicada a las ciencias sociales data de los años 60, sin embargo ha sido en los 90 cuando esta técnica ha comenzado a ser utilizada ampliamente. Hoy por hoy, existen diferentes formas de simulación y no existen tradiciones realmente asentadas.

Para realizar simulaciones los investigadores necesitan tomar teorías, que convencionalmente se expresaban en forma textual, y las deben formalizar en una especificación que pueda ser programable en un ordenador. Las simulaciones tienen “entradas” (inputs) introducidas por el investigador y “salidas” (outputs) que son observadas cuando la simulación se pone en funcionamiento. En muchos casos, las entradas son los atributos requeridos para hacer que el modelo se ajuste a alguna situación social específica y las salidas son el comportamiento del modelo a lo largo del tiempo, Gilbert y Troitzsch (2006, p.2).

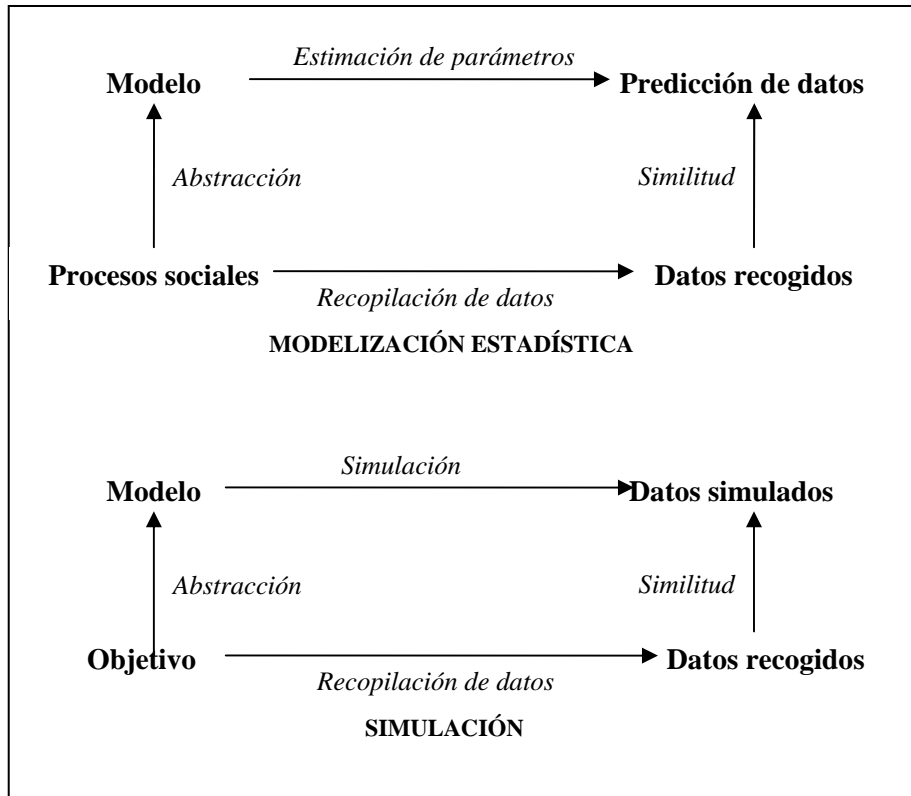
La simulación suele ser utilizada para dos cosas. En primer lugar, para obtener una mejor comprensión de algunas características del mundo social, por ejemplo, podemos observar continuamente decisiones que toman las empresas pero no sabemos las estrategias subyacentes que impulsan a la toma de dichas decisiones, en este sentido la simulación puede resultar útil. Otro uso de la simulación es la predicción, en este caso el objetivo es desarrollar un modelo que reproduzca fielmente la dinámica de algún comportamiento. Si lo conseguimos simulando podremos usar el modelo para “mirar hacia el futuro”. En realidad, las simulaciones deben satisfacer estos dos aspectos: deben orientarnos hacia la comprensión del fenómeno y en segundo lugar deben ser capaces de realizar predicciones.

En nuestro caso, las técnicas de simulación presentan ventajas frente a la modelización basada en las matemáticas. Los sistemas complejos tienen una dinámica no lineal y no pueden ser entendidos analíticamente. Con frecuencia no existe un conjunto de ecuaciones que puedan ser solucionadas para predecir las

características del sistema. La única forma de explorar el comportamiento no lineal, de forma efectiva, es simularlo. Taber y Timpone (1996) exponen varios argumentos sobre las ventajas de los lenguajes de programación frente a las técnicas matemáticas. En primer lugar, los lenguajes de programación son más expresivos y menos abstractos que la mayoría de los análisis matemáticos. En segundo lugar, tratan más fácilmente que los sistemas de ecuaciones matemáticas con procesos paralelos y con procesos sin un orden bien definido de acciones. En tercer lugar, los programas son (o pueden fácilmente llegar a ser) modulares, de modo que pueden realizarse cambios importantes en algunas partes sin necesidad de cambiar otras partes del programa, mientras que los sistemas matemáticos carecen de semejante modularidad. Y finalmente, podemos construir con bastante sencillez, sistemas de simulación que incluyan agentes heterogéneos (por ejemplo, para simular agentes económicos con diferentes capacidades), algo que es relativamente difícil usando las matemáticas.

Gilbert y Troitzsch (2006, p.13) destacan dos ventajas de las simulaciones por ordenador frente a otras herramientas: por un lado, permiten representar adecuadamente los aspectos dinámicos del cambio y por otro, la simulación puede ayudar a comprender la relación entre los atributos y comportamiento de los individuos (el nivel “micro”) y las propiedades globales de los grupos sociales (el nivel “macro”), es decir, es posible usar la simulación para investigar la emergencia.

La simulación experimenta con un modelo a diferencia de la investigación experimental, que lo hace con el fenómeno. En la simulación el investigador desarrolla un modelo basado en los supuestos sobre los procesos sociales, pero esta vez el modelo en lugar de una ecuación estadística, como ocurre en los modelos estadísticos, es un programa informático que se utiliza para generar datos simulados. Estos datos deben ser comparados con los recopilados del mundo real para comprobar si el modelo se ajusta a éste. Los modelos de simulación y los estadísticos pueden servir tanto para la explicación como la predicción de algún fenómeno social particular. La figura 8.3 reproduce de forma esquemática la lógica de modelización de ambas técnicas.



Fuente: Gilbert y Troitzsch (2006, p.16-17)

***Figura 8.3. La lógica de la simulación frente a la modelización estadística como método***

En los métodos de simulación pueden distinguirse las siguientes etapas: diseño, verificación y validación, Gilbert y Troitzsch (2006, pp.18 y ss).

1. Diseño: Cuando diseñamos un modelo un paso muy difícil es decidir qué necesita ser descartado y qué necesita ser incluido. Lo deseable es un modelo que encarne el mínimo número de suposiciones, pero que tenga aplicación tan generalmente como sea posible para numerosas circunstancias diferentes. A juicio de Axelrod (1997), la precisión (en términos del número de datos

puntuales y las asunciones incorporadas en el modelo) es importante cuando la meta es la predicción, mientras que la simplicidad es una ventaja si la meta es la comprensión. Habitualmente nos sentimos tentados a hacer un modelo más detallado de lo que realmente resulta necesario. Además, los modelos complicados tienen poca probabilidad de reproducir especialmente bien el comportamiento del mundo social, son difíciles de construir y la complejidad puede obstaculizar el descubrimiento de principios y relaciones nuevas. Una vez el modelo ha sido diseñado debemos construirlo. Tenemos dos vías, o bien escribir un programa informático específico o bien usar uno de los paquetes herramientas que ya han sido creados como asistentes para el desarrollo de simulaciones. Casi siempre, resulta más fácil usar un paquete que volver a empezar escribiendo un programa propio. La desventaja de estos paquetes es que son, lógicamente, limitados en lo que pueden ofrecer. Para algunos tipos de simulación existen diversos paquetes alternativos, mientras que para otros tipos no hay programas disponibles y no hay más remedio que diseñar un modelo propio.

2. La verificación es el proceso en el que se comprueba que el programa hace aquello para lo que fue diseñado. Debemos depurar la simulación, usando una colección de casos de prueba, compuesta por situaciones extremas donde los resultados sean fácilmente predecibles.
3. La validación consiste en comprobar que la simulación es un buen modelo del objetivo. Un modelo será válido si refleja el comportamiento del objetivo. La validez se determinará comparando el resultado de salida de la simulación con datos recopilados a partir del objetivo.

Una vez que se dispone de un modelo que parece ser válido. Habitualmente el investigador querrá realizar un análisis de sensibilidad que determinará hasta que punto la simulación es sensible a los supuestos iniciales que han sido efectuados.

En los modelos que veremos se utilizan los números aleatorios para modelizar los efectos de atributos personales de los agentes, tales como sus capacidades, riqueza, preferencias y emociones. La utilización de elementos aleatorios en la modelización implica que los resultados de una ejecución no tengan confianza. Hemos de establecer si los resultados son robustos al probar el proceso repetidamente con valores aleatorios diferentes.

Las primeras simulaciones realizadas en los años 60, consistieron en simulaciones de acontecimientos discretos, o en simulaciones basadas en la *dinámica de sistemas*. Esta aproximación utiliza extensos sistemas de ecuaciones de diferencias para seguir las trayectorias de las variables a lo largo del tiempo. Estos trabajos estaban enfocados a la predicción, pero no nos acercaban a la comprensión de cómo funciona el fenómeno estudiado. Más tarde, aparece otro enfoque que prosperó durante más de dos décadas es el llamado *microsimulación*. Esta herramienta se basa en una amplia muestra aleatoria de una población de individuos, de grupos familiares o empresas. Cada unidad es “envejecida” utilizando un conjunto de probabilidades de transición que determinan el riesgo de que la unidad experimente algún cambio durante el transcurso de un año, el proceso se repite año a año. Después se pueden calcular estadísticos agregados y utilizarlos como estimadores de las características futuras de la población. La microsimulación no tiene pretensiones de explicación, es simplemente una manera de predecir distribuciones futuras, trata individualmente a cada unidad, individuo, familia o empresa, pero no hay ningún intento de modelizar las interacciones entre las unidades. Además, las motivaciones o las intenciones de éstas se pasan por alto: cada unidad evoluciona año tras año tan sólo como respuesta de un generador de números aleatorios. Ya llegada la década de los noventa la simulación cambia radicalmente, principalmente como resultado del desarrollo de modelos multi-agentes que ofrecen la promesa de simular individuos autónomos así como las interacciones entre ellos. Estas oportunidades surgieron de las técnicas importadas desde el estudio de dinámicas no-lineales.

#### 8.4.2. Modelos de agente: definición y características.

La aproximación más prometedora para modelizar sistemas complejos como la vida, la inteligencia, o los fenómenos sociales y económicos, ha sido aquella que ha prescindido de la noción de “controlador central global”, y, en su lugar, se ha enfocado hacia la búsqueda y creación de mecanismos que definan la conducta de los agentes. En este sentido, los modelos multi-agente, parecen ser la herramienta más idónea que tenemos para explorar el comportamiento de estos fenómenos. No existe ninguna definición comúnmente acordada de lo que es un “agente”, el término se usa habitualmente para describir aquellos programas autónomos que pueden controlar las propias acciones basándose en sus percepciones de su entorno operativo, Huhns y Singh (1998). Los *agent-based modeling*, consisten en la utilización de ordenadores para crear y explorar el funcionamiento de sistemas descentralizados, como es el caso de los sistemas complejos autoorganizados. A lo largo de los años, los científicos en el campo han desarrollado una amplia variedad de modelos computacionales aplicables al estudio de muy diversos fenómenos.

Wooldridge y Jennings (1995) destacan que los agentes informáticos, típicamente tienen las siguientes propiedades:

- Autonomía, los agentes operan sin que otros tengan control directo de sus acciones y su estado interno.
- Habilidad social, los agentes interactúan con otros agentes mediante alguna clase de “lenguaje” (un lenguaje de máquina, en vez de lenguaje natural).
- Reactividad, los agentes pueden percibir su entorno (que puede ser el mundo físico, un mundo virtual de redes informáticas, o un mundo simulado que incluya otros agentes) y pueden responder al mismo;
- Proactividad del mismo modo en que pueden reaccionar a su entorno, los agentes son también capaces de tomar la iniciativa, involucrándose en un comportamiento dirigido a un objetivo propio.

Epstein (2005), estudioso de los sistemas descentralizados de carácter ascendente en el campo de las ciencias sociales y conocedor de la metodología multi-agente, considera que la contribución central de estos modelos es facilitar explicaciones generativas de los sistemas objeto de estudio. A partir de la generación de procesos, se intenta explicar regularidades sociales de carácter macroscópico. La clave es dar respuesta a cuestiones como esta: ¿cómo podrían interacciones locales autónomas, de agentes heterogéneos, con racionalidad limitada, generar la regularidad observada?. En nuestro caso, la regularidad observada a la que debemos dar explicación es la ley de Zipf observada en la distribución del tamaño de las empresas.

Si el objetivo es explicar ciertas pautas sociales, tendremos que ser capaces de generar, de hacer crecer, dichas pautas a partir de la definición de unas reglas de comportamiento para los agentes. El objetivo es explorar como surge el orden en un sistema descentralizado. Nosotros controlamos las reglas que definen las pautas de conducta de las partes, pero no las del sistema como un todo. Debemos actuar como un diseñador de microconductas, y a partir de ellas y de las interacciones de los agentes generar la pauta a nivel del todo.

Revisando a Epstein y Axtell (1996) y Epstein (1999), los modelos multi-agente y concretamente aquellos aplicados al estudio de sistemas sociales y también económicos, incluyen los siguientes rasgos clave:

1. Heterogeneidad

En la investigación en economía es tradicional la utilización de métodos de análisis basados en agentes representativos. En los modelos multi-agente no existen agentes agregados dentro de un entorno homogéneo; todo lo contrario, cada individuo es representado explícitamente, y cada uno de ellos pueden diferir de los otros por aspectos diversos como: la riqueza o bienestar, las preferencias, la memoria (capacidad de acumular información), reglas de decisión, la localización, la genética, y la cultura, entre otros.



2. Autonomía

En estos modelos no hay control central –o de arriba abajo– sobre la conducta de los agentes. Lo que se producen son retroalimentaciones entre las macroestructuras y las microestructuras. Por ejemplo, los agentes recién nacidos que están condicionados por las normas sociales o las instituciones que a su vez han tomado su forma y establecido sus reglas endógenamente, a partir de las interacciones de los agentes.

3. Espacio explícito

Los eventos generalmente siempre se desarrollan en espacios explícitos, que pueden ser paisajes de recursos renovables, en una cuadrícula o reja n-dimensional, como en Epstein y Axtell (1996), o tratarse de una red social dinámica u otro tipo estructuras.

4. Interacciones locales

Típicamente, los agentes interactúan con otros agentes en el espacio, generalmente, con agentes que pertenecen a su “vecindad”, pues, se suele suponer que, debido a la racionalidad limitada, los agentes interactúan con aquellos otros agentes que pertenecen a su entorno local. Generalmente, de estas interacciones no suele generarse una mezcla o estructura uniforme; por ejemplo, como ya sabemos, en el caso del modelo de segregación desarrollado por Schelling, las interacciones locales de los agentes provocan una estructura segregada de las pautas de localización de los agentes, aunque ellos explícitamente no deseen dicha segregación . La mezcla uniforme no es generalmente la regla.

5. Racionalidad limitada

Hay dos componentes que justifican la racionalidad limitada de los agentes. Por un lado el hecho de que la información es limitada, los agentes no tienen toda la información que existe y que sería relevante para su toma de decisiones y, en segundo lugar, los ordenadores tienen una capacidad limitada de procesamiento de información, los agentes no tienen información global pues no existe una capacidad computacional infinita. Y aunque lo

fuera, no hay optimizadores globales; los agentes usan reglas simples basadas en información local.

Según Epstein (2005), la teoría de la información y la complejidad computacional sugieren que hay dos limitaciones inherentes al paradigma de la elección racional. Una limitación tiene su origen en la posibilidad de que los problemas de los agentes no puedan ser determinados, no existe un proceso computacional para el cual todos los inputs puedan dar la respuesta necesaria en un tiempo finito. Y una segunda limitación, impuesta por la complejidad computacional, en el cual aunque el problema pueda ser determinado, el coste computacional de resolverlo puede ser en muchas situaciones tan grande que arruine la posibilidad de poder ser resuelto a partir de la elección racional óptima.

Por otro lado, los estudios en psicología y en conducta económica indican que el *homo sapiens* no se comporta como el *homo economicus*, ver Simon (1982, 1987), Hahn (1991), y Arrow (1987). Sabemos que el *homo economicus* es una idealización para el desarrollo de un modelo, al igual que lo son en física los gases ideales o las masas puntuales. Pero como afirma Epstein (2005), mientras que estas idealizaciones han sido útiles en física, en las ciencias sociales parecería apropiado preguntarse si esta idealización de la racionalidad individual ilumina más que oscurece. La evidencia empírica lo pone en duda.

#### 6. Dinámica fuera del equilibrio

La dinámica de situaciones fuera del equilibrio es una cuestión central para los diseñadores de modelos de agente, como las transiciones a gran escala y la emergencia de regularidades macroscópicas procedentes de interacciones locales de carácter descentralizado. En los modelos que a nosotros nos interesan, el sistema debe encontrarse fuera del equilibrio, continuamente nuevos agentes (empresas) entran y salen del sistema. Se trata de sistemas que generan una macroconducta –a nivel del todo- que permanece estable, compatible con una gran inestabilidad a un nivel inferior. Mientras que la distribución del tamaño de las empresas alcanza una situación metaestable, caracterizada por una ley potencial, aun nivel inferior existe alta inesta-

bilidad. Aunque la distribución permanezca estable no lo hace el tamaño de cada una de las empresas que la forman, todo lo contrario, la posición de las empresas en función de su tamaño varía mucho a lo largo del tiempo. Es estable la estructura de la función pero no los elementos que la forman, al igual que las turbulencias que se forman en el flujo de un líquido.

#### **8.4.3. Los modelos multi-agente aplicados al estudio de fenómenos económicos**

Los modelos de agente aplicados al estudio de la economía, conocidos como *ACE*, *agent-based computational economics*, describen el estudio por ordenador de economías modelizadas como sistemas evolutivos formados por agentes autónomos en interacción, Richiardi (2003).

Los sistemas multi-agente son claramente de aplicación en el campo de la economía, pues ésta es una ciencia donde las consecuencias, sean intencionadas o no, se producen por la interacción de gran cantidad de agentes individuales en un entorno caracterizado por los recursos escasos. Otra ciencia que también ha sido de importante aplicación para esta metodología, es la física, pues también en ella existen multitud de agentes en interacción. Sin embargo, sabemos que entre física y economía, existe una diferencia fundamental: el rasgo de la intención. Los agentes en la economía, a diferencia de los de la física, actúan motivados por unos objetivos.

En Tesfatsion (2003) se revisan las principales áreas en el campo de la economía en las que han tenido (y tienen) relevancia las simulaciones basadas en modelos de agente. Estas son: 1) Aprendizaje y funcionamiento de la mente; 2) evolución de las normas de conducta; 3) modelización de procesos de mercado como sistemas *bottom-up*; 4) modelización de organizaciones; 5) formación de redes económicas 6) diseño de agentes computacionales para mercados automatizados; 7) experimentos paralelos con agentes reales y por ordenador; 8) programación de herramientas por la modelización ACE. La lista de referencias incluye 111 trabajos seleccionados entre las más interesantes aplicaciones del

área. Los modelos de mercados de trabajo han sido considerados entre las aplicaciones más importantes.

La literatura sobre modelos basados en agentes ha crecido sensiblemente en los últimos años. Según cita Tesfatsion (2001): actualmente existen buenas colecciones al respecto, como *The Sackler Colloquium, Proceedings of National Academy of Sciences (2002)*; emisiones especiales en revistas académicas: *Computational Economics 2001, The Journal of Economic Dynamics and Control 2004*; numerosos artículos individuales en revistas académicas como *Computational and Mathematical Organization Theory*; también en revistas científicas como *Nature y Science* y por último libros como: Epstein y Axtell (1996), Axelrod (1997) y Cederman (1997). Surgen nuevas revistas, como por ejemplo: *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, y compiten varias plataformas entre las que se destacan: Netlogo, Ascape, Repast, Swarm y MASON<sup>43</sup>. Hoy en día se han formado sociedades internacionales sobre modelizaciones basadas en agentes y se realizan cursos sobre modelización en las mejores universidades.

#### ***8.4.4. Algunas cuestiones epistemológicas sobre la utilización de modelos basados en agentes***

Los modelos basados en agentes son una metodología que se aleja de otras más tradicionales, como el análisis deductivo a partir de modelos matemáticos. En las líneas siguientes exploraremos cuales son las peculiaridades de los modelos de agente como herramienta para la investigación científica, destacando sus ventajas y limitaciones.

La primera cuestión a destacar es que los modelos de agente deben ser modelos “generativos”. Hemos de diseñar el modelo de tal forma que dotando a

---

43. Netlogo en: <http://c1l.northwestern.edu/netlogo>

Swarm en: <http://wiki.swarm.org/>

Repast en: <http://repast.sourceforge.net/>

MASON en: <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason>

Ascape en: [www.brook.edu/ES/dynamics/models/ascape/](http://www.brook.edu/ES/dynamics/models/ascape/)

los agentes de unas determinadas microespecificaciones o reglas sean capaces de reproducir una macroconducta observable. En nuestro caso deberíamos determinar un modelo que a partir de unas reglas definidas para los agentes (empresas), la dinámica de interacciones genere una distribución para el tamaño de las empresas que cumpla la ley de Zipf.

En el desarrollo de modelos pueden darse varias situaciones. Por ejemplo, que no se genere la conducta deseada, bien porque la microespecificaciones no son correctas, o bien porque no son correctos los valores que se han aplicado a dichas especificaciones. Por otro lado, es posible que aún encontrando unas reglas que sean capaces de reproducir una conducta, no podamos inferir con seguridad que sean dichas especificaciones las adecuadas para explicar la emergencia de la conducta agregada. Pueden existir otros modelos o especificaciones alternativas que también la generen. En ese caso deberán compararse los diferentes modelos y determinar cuál es la solución más satisfactoria. En resumen, los modelos de agente deben ser modelos “generativos” de una macroconducta, pero, teniendo en cuenta que la capacidad de generar un modelo no es una condición suficiente para poder dar una explicación de este; es decir, la generación de macroconductas es una condición necesaria pero no suficiente.

Por otro lado, los modelos de agente han recibido diferentes críticas por parte de la comunidad de investigadores, Epstein (2005) considera tres de ellas, como las más importantes: en primer lugar, se acusa a los modelos de agente de no utilizar ecuaciones, en segundo lugar de no ser deductivos, y en tercer lugar, de ser modelos ad-hoc y por lo tanto de no tener generalidad. Las dos primeras, afirma Epstein que no son ciertas y la tercera, la considera irrelevante.

Cada modelo de agente es, después de todo, un programa informático, que está típicamente codificado en un lenguaje de programación. En este sentido, se puede definir cualquier modelo de agente como un conjunto explícito de fórmulas matemáticas (funciones recursivas). Aunque en la práctica dichas funciones pueden ser extremadamente complejas y difíciles de interpretar, técnicamente existen. En todo caso, los modelos basados en funciones recursivas serían bas-

tante irreconocibles como modelos de interacción social, mientras que un modelo de agente equivalente sería claramente reconocible. Más allá de si las funciones o ecuaciones equivalentes son fáciles o difíciles de obtener, los modelos de agente tienen la ventaja de permitir observar como evoluciona el modelo en miles de pasos y obtener una importante cantidad de datos.

La segunda acusación sobre los modelos de agente es que no son deductivos, sin embargo esto no es del todo correcto, según Epstein (2005): cualquier realización de los modelos de agente es una estricta deducción, pues las explicaciones generativas implican una deducción, aunque lo inverso no es cierto, pues es posible deducir sin generar. Pero es necesario hacer notar que no todos los argumentos deductivos tienen carácter constructivo como modelos de agente.

Respecto a la tercera de las acusaciones, que los modelos de agente son ad-hoc y no tienen generalidad, es cierto. Claramente los modelos de agente se aplican sobre conjunto más pequeños, tienen menos generalidad en sus afirmaciones que, por ejemplo, las teorías microeconomías neoclásicas o los modelos macroeconómicos. Sin embargo, este hecho no tiene porque constituir una limitación para su validez, por lo menos en lo relativo a cuestiones como a la que a nosotros nos ocupa: explicar la aparición de una macroconducta en un determinado tipo de sistemas, los formados por empresas.

Los modelos de agente, en muchos casos, tienen como meta explicar la emergencia de regularidades estadísticas observadas en diferentes sistemas. En estos casos, cada uno de los modelos desarrollados, con determinadas especificaciones para los agentes y el entorno, constituirán un modelo deductivo.

#### ***8.4.5. Un modelo multi-agente que reproduce distribuciones de ley potencial.***

Como vimos en el capítulo 2, se conocen muchos fenómenos que se distribuyen conforme a una ley potencial, y sabemos que estas leyes están

presentes en la arquitectura de los sistemas complejos. Es, por lo tanto, lógico que los modelos multi-agente hayan sido utilizados para intentar indagar en las causas subyacentes de la emergencia de este tipo de distribuciones. La aplicación más conocida, o por lo menos la más cercana a nuestro interés, a excepción del modelo de Axtell expuesto en el siguiente apartado, es un modelo anterior, conocido como Sugarspace, de Epstein y Axtell<sup>44</sup>.

Sugarspace modela una sociedad artificial en la que los agentes se mueven por una cuadrícula de 50 x 50 celdas. Cada celda tiene una cantidad renovable de un recurso, en este caso “azúcar”, que el agente ubicado en la celda puede comer. Los agentes deben consumir azúcar para sobrevivir. Si consumen más azúcar del que necesitan pueden conservarlo y lo pueden comer más tarde, en variantes ampliadas del modelo original los agentes pueden intercambiar sus excedentes con otros agentes. El modelo demuestra que aún cuando los agentes comienzan con una distribución de la renta (cantidad de azúcar acumulada por agente) aproximadamente simétrica, pronto se desarrolla una distribución de la riqueza fuertemente sesgada. Epstein y Axtell (1996) crean un modelo en el cual la distribución de la riqueza de los agentes, determinada por la cantidad de azúcar acumulado por cada uno de ellos, se ajusta a una distribución del Pareto.

Los agentes tienen asignadas ciertas capacidades (atributos): pueden ver el entorno y tienen un metabolismo que determina la cantidad de azúcar que necesitan consumir. Estos atributos se distribuyen aleatoriamente entre la población. Los agentes tienen una motivación, la acumulación del recurso, lo buscan y se mueven hacia éste en base a una regla: buscar la celda desocupada que tenga más azúcar disponible dentro de los límites marcados por su vista y moverse hasta ella. Aquellos agentes que su nivel de azúcar desciende hasta cero mueren. En todo caso, todos los agentes mueren cuando alcanzan su límite vital (edad máxima determinada). Nuevos agentes con una asignación aleatoria del recurso reemplazan a los agentes muertos.

---

44. Epstein, J.M. y Axtell, R. (1996): *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. MIT Press, Cambridge, MA.

La figura 8.4 muestra la interfaz de una aplicación realizada con el programa Netlogo<sup>45</sup>, una adaptación del Sugarscape de Epstein y Axtell denominada *Wealth distribution*<sup>46</sup>. Utiliza como recurso el grano en lugar del azúcar. Los agentes recogen grano de las parcelas y lo comen para sobrevivir. La riqueza de cada agente viene dada por el grano que es capaz de acumular. Cada parcela tiene una cantidad de grano y una capacidad de reproducirlo. Mientras que en el modelo original de Epstein y Axtell, el recurso (azúcar) se acumula en dos zonas, en el centro se encuentran las parcelas más ricas y la cantidad de azúcar por parcela descende a medida que nos alejamos de ese centro, en la aplicación de Netlogo el recurso se distribuye aleatoriamente.

Como muestra la figura 8.4., el modelo comienza con una distribución simétrica de la riqueza y demuestra que, cuando los agentes tienen información limitada (solo son capaces de ver parte del entorno, lo más próximo), los recursos son escasos y estos agentes están motivados hacia la acumulación del recurso, se genera una distribución de la riqueza fuertemente sesgada y acorde con la descrita por Pareto. La distribución aleatoria del valor de los atributos que caracterizan a los agentes como la capacidad de visión o el metabolismo, juegan un importante papel. Aquellos agentes dotados con mayores capacidades, es decir, relativamente mejor dotados, son capaces de acumular más y más riqueza.

A partir de la aplicación *Wealth Distribution*, dividimos a la población en 10 clases en base al nivel de riqueza alcanzado. La clase más pobre estará formada por todos aquellos agentes que tienen una riqueza inferior a 1/10 de la riqueza que posea el agente más rico; la segunda clase, por aquellos con una renta inferior a 2/10 (y  $\geq 1/10$ ) y así sucesivamente. Se parte de una población de 1000 agentes y una distribución aproximadamente simétrica. Desde los primeros momentos se observa como la distribución comienza a hacerse asimétrica con la presencia de gran cantidad de agentes con una baja riqueza. En la figura los agentes con menores niveles de riqueza se representan con tonos rojizos, los de las clases o intervalos medios, con tonos verdosos y las de mayor nivel de riqueza en tonos azules.

---

45. Netlogo contiene una biblioteca de modelos, que es una amplia colección de simulaciones pre-escritas que, como en este caso, pueden ser usadas y modificadas

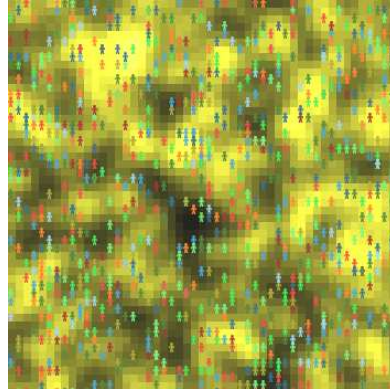
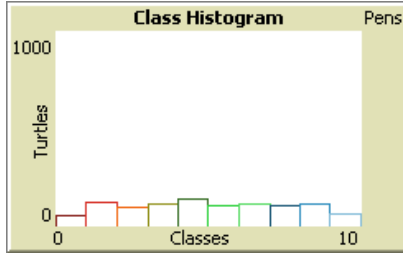
46 . Wilensky, U. (1998): Netlogo Wealth Distribution model.

En: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WealthDistribution>

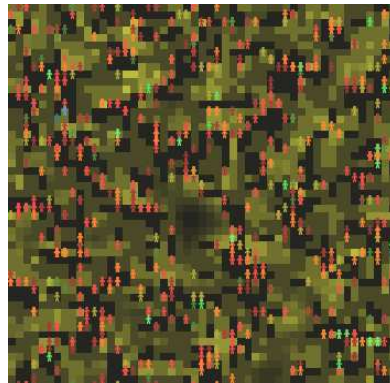
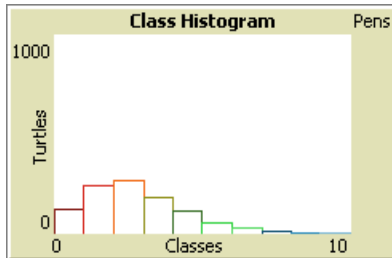


**Nº de agentes = 1000**

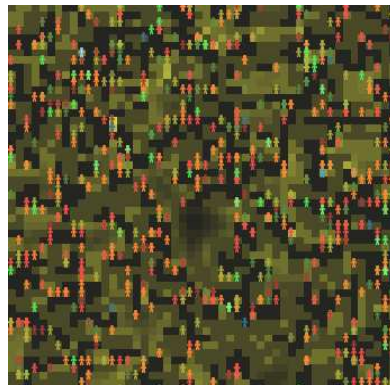
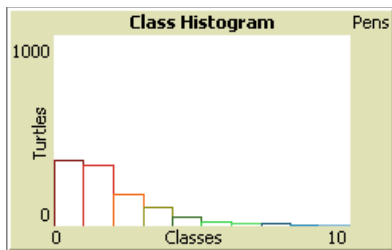
**t = 0**



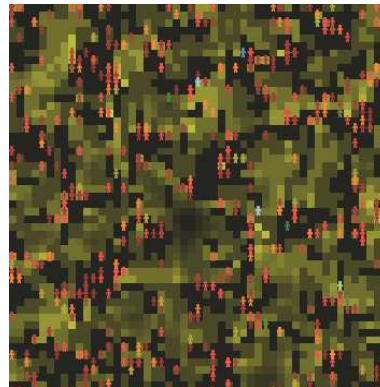
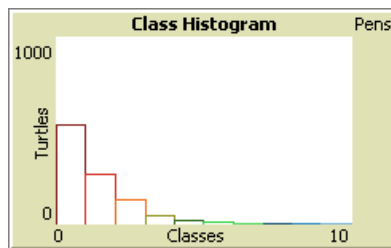
**t = 7**



**t = 25**



t = 1328



Valores del modelo: a) Atributos de los agentes: máxima visión =7; máximo metabolismo =7; edad mínima =1; edad máxima = 86. b) Atributos de las parcelas (el entorno): espacio con máxima riqueza =16%; frecuencia de crecimiento del grano = 3 cantidad de grano que crece por periodo.= 4.

Fuente: Netlogo “Wealth distribution” y elaboración propia.

**Figura 8.4. Sugarscape, un modelo capaz de generar una distribución en la riqueza que se ajusta a una ley potencial**

#### **8.4.6. Un modelo multi-agente en la explicación de la distribución del tamaño de las empresas**

Los trabajos de Axtell (1999, 2002) tienen como objetivo definir un modelo de agente que sea capaz de generar una distribución del tamaño de las empresas que se comporte de acuerdo a una ley potencial. Es decir, trata de crear un modelo por ordenador basado en las interacciones de agentes (personas) en sistemas descentralizados (el mercado), que sea capaz de reproducir una distribución del tamaño de las empresas que cumpla la ley de Zipf.

Desarrolla un modelo donde la estructura, la distribución que emerge, es consecuencia de las interrelaciones entre agentes (empresas), en un contexto de no equilibrio y racionalidad limitada. El modelo también ha sido extendido a la

explicación de la distribución del tamaño de las ciudades, Axtell y Florida (2000).

Axtell a partir de un mundo artificial creado en el ordenador, mediante el establecimiento de una micro-reglas, será capaz de reproducir un modelo en el que, a largo plazo, se llegue a una distribución macroestable que coincide con la evidencia empírica observada. Para ello define un modelo basado en los siguientes supuestos:

- La población es heterogénea
- Existe racionalidad limitada.
- Se producen interacciones locales entre las empresas de la población.
- Se establecen preferencias renta-ocio para los agentes.
- Existen rendimientos crecientes de la cooperación, de la formación de grupos.
- Los agentes en los grupos actúan no cooperativamente.

Axtell plantea un escenario de agentes artificiales dotados de racionalidad limitada, visión local y de ciertas preferencias en cuanto a los ingresos. Las ecuaciones expresan la toma de decisiones de los agentes después de procesar la información que recogen de los miembros de su “red social”, es decir, de las interacciones locales.

Desde la visión de Axtell, las empresas crecen desde el *bottom-up*. La distribución del tamaño de las empresas que nosotros observamos es una consecuencia de multitud de decisiones tomadas por los agentes (en este caso las personas) que deciden incorporarse a un grupo (en este caso una empresa) basándose en sus preferencias, su racionalidad limitada y el carácter local de las interacciones.

Se considera que los agentes tratan de maximizar su bienestar representado por una función de utilidad que depende de: la preferencia por el ingreso, la cantidad de input que aporta al grupo, la cantidad de input total del grupo y la compensación que reciben por la aportación de su input. Se establece que la

compensación no puede ser decreciente en relación al output aportado. Por otro lado, los agentes son heterogéneos, presentan diferentes preferencias por el ingreso, cualificación y proporción de input aportado. En base a estos supuestos los agentes actúan no cooperativamente. Cada agente intenta maximizar su bienestar y lo intentará conseguir reduciendo la dotación de input o nivel de esfuerzo que realiza, intentará mejorar su bienestar a costa de los demás agentes del grupo. Cuando un nuevo agente entra en el grupo, el output total de este aumenta tanto por la aportación al input del nuevo miembro como por los rendimientos crecientes derivados de la cooperación. Cada agente intentará beneficiarse de estos aspectos y podrá reducir su nivel de aportación al input, sin que lo haga el output total del grupo. Al aumentar el tamaño del grupo es posible que los rendimientos crecientes compensen la disminución del esfuerzo de algún agente de manera que es posible el aumento de las retribuciones habiendo reducido el input aportado.

El modelo de Axtell (1999) revisado en Axtell (2002) e inspirado en la teoría de juegos, considera que la explicación de la distribución del tamaño de las empresas debe ser diseñada a partir de la dinámica de generación de grupos (de trabajo). Demuestra que los agentes alcanzan un equilibrio de Nash pero que éste no es estable, existe un determinado tamaño a partir del cual el equilibrio se vuelve inestable y los miembros del grupo quieren abandonarlo provocando una reducción en su tamaño y a la larga su desaparición. La inestabilidad del grupo tiene que ver con los *free riders*. Cuando se incorporan nuevos agentes que desean contribuir menos al output –en Axtell (1999), tienen menos preferencia por el ingreso– su incorporación provoca una reducción del output y una revisión de las expectativas de los miembros del grupo a la baja. De manera que aquellas empresas que alcanzan más éxito y permanecen más tiempo en el mercado son las que menos atraen a los *free riders* o con otras palabras las que son capaces de atraer a los trabajadores con más preferencia por el ingreso, aquellos más productivos.

Por otro lado, Gallegati et al. (2003) desarrollan un modelo sobre la fragilidad financiera de las empresas Cuando estas son heterogéneas y

interactúan a través de mercados de crédito, el modelo también reproduce distribuciones de ley potencial para el tamaño de las empresas.

## **CONCLUSIONES**

Este último apartado de la memoria, se destina a exponer cuales son las conclusiones básicas que se derivan de la investigación realizada. Además, se esboza cuál deberá ser el camino a seguir para la futura investigación.

1. En primer lugar, la evidencia empírica muestra, a lo largo de numerosos trabajos, que la distribución del tamaño de las empresas es, generalmente, altamente asimétrica; los datos se ajustan a una ley potencial o, con otros términos, cumplen la ley de Zipf. Como ya ha sido referido varias veces a lo largo de esta memoria -especialmente en los dos primeros capítulos- el comportamiento de ley potencial de la distribución del tamaño de las empresas implica que existe una relación inversa entre el tamaño de la empresa y su frecuencia de aparición. Esta evidencia ha sido contrastada para poblaciones de empresas de múltiples países, comenzado por Estados Unidos y continuando por diferentes economías desarrolladas, como los países de la Unión Europea, Japón y el resto de países de la OCDE. Este trabajo ha ampliado la evidencia empírica al respecto, comprobando que, en nuestro país, también se cumple la ley de Zipf. De forma breve, los resultados que arroja la evidencia empírica han sido los siguientes:

- Los datos sobre tamaño de las empresas se ajustan a una ley potencial pero la forma de la distribución –el exponente– difiere, significativamente, de unos países a otros. Además, la diferencia observada en la pendiente entre países con niveles políticos y económicos similares, nos indica que deben existir algunos aspectos (quizás no estrictamente económicos) que condicionan la estructura del tejido empresarial.

- Generalmente, se observa que para cada país la pendiente de la distribución, permanece relativamente estable para amplios periodos de tiempo.
  - La distribución del tamaño de las empresas tiene un comportamiento fractal. Se ha comprobado que, en España, la distribución se ajusta a una ley potencial en diferentes escalas espaciales: para todo el país, para diversas Comunidades Autónomas y también para diversas provincias y grandes ciudades que pertenecen a diferentes Comunidades Autónomas.
2. Los fenómenos que se comportan como leyes potenciales, lejos de ser algo específico de las empresas o incluso de la economía, han sido observadas en fenómenos cuyo estudio pertenece a ramas tan diversas como la física, la biología, la geografía, la lingüística, o la economía. Actualmente, se reconoce el carácter ubicuo de las leyes potenciales y se considera que forman parte de la arquitectura de los sistemas complejos. Estos sistemas se caracterizan por estar formados por gran cantidad de agentes en interacción, cuya conducta depende de muchas y diversas variables. En ellos, no es posible aislar y determinar la influencia que tiene cada variable en el sistema, e incluso, en muchos casos, tampoco es posible determinar todas las variables que le afectan.
  3. Las leyes potenciales están directamente relacionadas con la aparición de orden espontáneo. Son el resultado de un proceso de autoorganización en sistemas que se encuentran alejados del equilibrio. En nuestro caso, el sistema formado por las empresas que abastecen un mercado, se encuentra fuera del equilibrio ya que en él se producen continuas entradas y salidas de empresas. A partir de este alejamiento del equilibrio, el sistema es capaz de crear, de forma espontánea, una estructura –o comportamiento estadístico– estable: la ley potencial observable solo a nivel del sistema como un todo.
  4. Si consideramos que la ley potencial observada para la distribución del tamaño de las empresas es una manifestación de la emergencia de orden

espontáneo, el paso siguiente debe orientarse a investigar como se produce este proceso de autoorganización, es decir, qué mecanismos o dinámica caracteriza al sistema para que emerja esta macroconducta, o, con otras palabras, cuales son los mecanismos subyacentes a la autoorganización. Pese a la suficiente evidencia empírica del ajuste de los datos a la ley potencial, no han emergido explicaciones teóricas, suficientemente, satisfactorias de los mecanismos o las causas que generan la aparición de estas distribuciones. En un primer momento, debido al carácter universal de estas leyes, se pensó en la posibilidad de buscar planteamientos, que fuesen capaces de explicar la aparición de la ley en fenómenos de cualquier tipo. Sin embargo, con el tiempo, esta idea fue abandonada y hoy se considera que la emergencia de estas leyes debe ser analizada y explicada con las herramientas propias de cada disciplina.

5. Aunque es cierto que la abundante emergencia de leyes potenciales es una cuestión cuya explicación no está resuelta, por lo menos en el campo de la economía. Y que, además, deberá resolverse con las herramientas propias de cada campo. Sí parece conveniente resaltar algunos avances e hipótesis interesantes que se han realizado en otros campos. En primer lugar, la física de los sistemas complejos descubre que muchos sistemas, de forma espontánea, tienden en su dinámica hacia una situación *metaestable* caracterizada por la aparición de leyes potenciales en el tamaño de las avalanchas o intensidad del suceso. Se trata de sistemas que se encuentran fuera del equilibrio, donde un mismo hecho o evento puede provocar, tanto efectos apenas apreciables como efectos catastróficos. Estos sistemas reciben el nombre de *críticamente autoorganizados*. La biología evolutiva parece estar de acuerdo con estos planteamientos, comprobando que los ecosistemas y las biosferas también se ajustan a comportamientos en los que perturbaciones aparentemente similares pueden tener efectos de magnitudes muy diversas, característica típica de los sistemas complejos que presentan dinámicas no lineales en situaciones fuera del equilibrio. Recientemente, la teoría de redes también ha observado que la topología de grandes redes como la World Wide Web tiene un comportamiento potencial –pocos nodos



altamente conectados, junto a gran cantidad de nodos con pocos enlaces- en estos casos los ataques a la red pueden provocar efectos muy diversos, tanto inapreciables como catastróficos. Esta característica también está presente en la economía: una perturbación negativa puede difundirse por todo el tejido empresarial provocando grandes daños al sistema y el cierre de muchas empresas o, por el contrario, puede tener efectos casi imperceptibles.

6. La distribución observada del tamaño de las empresas emerge de las múltiples interacciones que se producen entre los agentes que actúan en el sistema, en nuestro caso, las distintas empresas o equipos de trabajo. La ley potencial es un *macrocomportamiento* que nunca puede derivarse del estudio de la conducta individual de cada una de las empresas que lo forman. Cada empresa, tiene una información limitada y es incapaz de abarcar la totalidad. La emergencia de la distribución se deriva de la racionalidad limitada de los agentes y de sus interacciones de carácter local (no en un sentido estrictamente geográfico). Como ya observó, en primer lugar la física, la estabilidad que aparece a nivel del sistema –la ley potencial- contrasta con la “turbulencia” a un nivel inferior.
7. Actualmente, la explicación más satisfactoria sobre la emergencia de fenómenos que se distribuyen como leyes potenciales, en el campo de la economía y, específicamente, de la distribución del tamaño de las empresas, ha sido la proporcionada por Simon (1955, 1958). Argumenta que las distribuciones asimétricas y el comportamiento potencial puede ser debido a un proceso de crecimiento aleatorio donde el tamaño de las empresas no es significativo en el crecimiento de éstas. Aunque este modelo sea capaz de reproducir el macrocomportamiento observado, ha recibido muchas críticas dirigidas a su poca capacidad explicativa y a su falta de contenido económico. Mucho más recientemente, en la segunda mitad de la década de los 90, la teoría de redes ha descubierto que las grandes redes del mundo real como las biosferas o la World Wide Web, tienen una estructura de ley potencial en la conectividad de sus nodos, proponiendo modelos explicativos

sobre la formación de estas redes, muy similares a los expuestos por Gibrat y Simon.

8. Más allá de los avances en el concepto de autoorganización desde la termodinámica y la complejidad, en las distintas ramas de la ciencia, han surgido investigadores interesados en lo que hoy conocemos como sistemas emergentes, también llamados sistemas ascendentes o de conducta *bottom-up*. Sabemos que en estos sistemas no existe una autoridad centralizada que planifique su funcionamiento, contrariamente, el sistema se organiza de forma descentralizada, a partir de las interacciones de los múltiples agentes que lo forman. En los sistemas descentralizados y autoorganizados es muy importante diferenciar entre niveles, por ejemplo, entre el comportamiento de una hormiga y el de la colonia, el de una persona y el del grupo o colectivo, y el de los agentes individuales -empresas o consumidores- respecto al comportamiento del mercado. En este trabajo se considera, como ya lo hicieron otros –Smith, Menger, Hayek, Schelling o Krugman- que el mercado es un sistema autoorganizado. Al igual que ocurre con otros sistemas, el mercado es un sistema ascendente que adquiere más complejidad por las interacciones entre sus agentes, ya sean empresas, inversores, consumidores, etc. Los rasgos que caracterizan a un mercado no pueden inferirse del estudio de cada agente participante en el sistema. Si queremos explicar ciertas pautas observadas en los mercados, como es en nuestro caso, la distribución del tamaño de las empresas, el reto consiste en encontrar aquellos mecanismos o conductas de los agentes que sean capaces de reproducir la emergencia observada. En este sentido, los modelos multi-agente son la herramienta más adecuada para conseguir este objetivo.
  
9. El desarrollo de las ciencias de la información ha permitido la aparición de una nueva herramienta metodológica, los sistemas multi-agente, basada en la creación de sistemas artificiales que viven y se desarrollan en el ordenador. El objetivo es simular el funcionamiento de sistemas reales a partir del diseño de unas micro-reglas en el comportamiento de los agentes que viven en el ordenador. La distribución del tamaño de las empresas ya ha

comenzado a ser un campo estudiado por los modelos de agente, Axtell (1999, 2002), figura destacada en el campo, ha desarrollado un modelo basado en la formación de grupos de trabajo, que a partir de la determinación de ciertas micro-reglas para los agentes (en este caso personas) que actúan en el sistema, es capaz de generar una distribución por tamaños para las empresas que cumple la ley de Zipf. Pese a este importante paso hacia delante, nada nos asegura que esas micro-reglas definidas por Axtell sean realmente la causa de la asimetría observada en la distribución.

10. La futura investigación debe orientarse hacia el desarrollo de modelos de agente que sean capaces de reproducir una distribución potencial para el tamaño de las empresas. Para ello deberemos orientar nuestros esfuerzos a la búsqueda y definición de las micro-reglas que generen el macrocomportamiento deseado. Ello supondrá la ejecución de varias tareas, en primer lugar será necesario ser capaces de implementar un modelo multi-agente por ordenador bien diseñándolo desde sus inicios, lo cual es bastante complicado o también utilizar diversos programas informáticos ya existentes, especialmente, por ejemplo Netlogo, Swarm o también Pajek en el campo del diseño de redes. En segundo lugar, ser capaces de encontrar mecanismos que nos ayuden a la búsqueda de las micro-reglas adecuadas y en tercer lugar a cuantificarlas.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Albert, R., Jeong, H. y Barabasi, A.L. (2000): *Error and attack tolerance of complex networks*. *Nature* n° 406 pp. 378-382.
- Amaral, L.A.N.; Buldyrev, S.; Havlin, S.; Leschhorn, H.; Maas, P.; Salinger, M.; Stanley, E. y Stanley, M. (1997): *Scaling behavior in economics: Empirical results for company growth*. *J. Physique France* n°7, pp. 621-633.
- Amaral, L.A.N.; Gopikrishnan, P.; Plerou, V. y Stanley, H.E. (2001): *A model for the growth dynamics of economic organizations*. *Physica A* n° 299 pp.127-136
- Arrow, K.J. (1987): *Rationality of self and others in an economic system*. En Hogarth, R. M. y Reder, M.W. editors: *Rational Choice: The Contrast Between Economics and Psychology*. University Chicago Press.
- Arthur, W.B. (1990): *Positive feedbacks in the Economy*. *Scientific American*, vol. 262, n° 2, pp. 92-99.
- Arthur, W.B. (1991): *On designing economic agents that behave like human agents: A behavioural approach to bounded rationality*. *American Economic Review* n° 81, pp.353-359.
- Atkins, P. W. (1984): *The second law*. Freeman & co., Nueva York.
- Atkins, P.W (1992): *La segunda ley*. Prensa Científica, Barcelona.
- Axelrod, R. (1997): *The Complexity of Cooperation*. Princeton University Press. Princeton, NJ.
- Axtell, R. L. (1999): *The Emergence of Firms in a Population of Agents*. *Working pape*. *Santa Fe Institute*, Santa Fe, Nuevo Méjico.  
[www.book.edu/es/dinamics/papers](http://www.book.edu/es/dinamics/papers).

- Axtell, R.L. (2001): *Zipf Distributions of U.S. Firm Sizes*. *Science*, vol 293, septiembre 2001. pp. 1818-1820.
- Axtell, R.L. (2002): *Non-Cooperative Dynamics of Multi-Agent Teams*. *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Bolonia, Italia, 15 de Julio de 2002.
- Axtell, R.L. y Florida (2000): *The evolution of Cities: A Microeconomic Explanation of Zipf's Law*. *The Brooking Institute and Carnegie Mellon University. Working Papers Studies* n° 52. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Bak, P.; Tang, C. y Wiesenfeld, K. (1988): *Self-organized criticality*. *Physical Review A*. vol.38, pp. 364-374.
- Bak, P. y Chen, K. (1991): *Self-Organized Scientific American* n° 264, pp.46-53.
- Bak, P. (1996): *How nature Works: the science of self-organized criticality*. Copernicus, Nueva York.
- Barabási, A.L. y Albert, R. (1999): *Emergence of Scaling in Random Networks*. *Science*, n° 286, pp.509-512.
- Batten, D. (2000): *Discovering artificial economics: How agents learn and economies evolve*. Boulder, CO, Westview Press.
- Bertalanffy, von L. (1993): *Teoría General de Sistemas*. Fondo de Cultura Económica, Madrid, 3ª reimpresión de la primera edición en español de 1976. [Edición original: 1968, *General System Theory Foundations, Development, Applications*, Revised edition, Nueva York, George Braziller.].
- Boya, L. J.; Carreras, A. y Escorihuela, J.L. (1990): *Azar, Caos: Unas premisas*. En Carreras, A.; Escorihuela, J.L. y Requejo. A. (eds): *Azar, Caos e indeterminismo*, pp.13-49. Prensas Universitarias, Zaragoza,.
- Briggs, J. y Peat, F.D. (1989): *Espejo y reflejo. Del caos al orden. Guía ilustrada de la Teoría del Caos y la ciencia de la totalidad*. Gedisa, Barcelona.

- Capra, F. (1998): *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama, Barcelona.
- Casti, J.L. (1994): *Complexification: Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. HarperCollins, Nueva York.
- Cederman, L.E. (1997): *Emergent Actors in World Politics: How States and Nations Develop and Dissolve*. Princeton University Press.
- Chiavenato, I. (2001): *Introducción a la Teoría General de la Administración*. McGraw Hill.
- Childe, V. G. (1936/1981): *Man Makes Himself*. Bradford-on-Avon, Wiltshire: Moonraker.
- Dahui, W. Z; Li, Z. y Zengru, D. (2005): *Bipartite Producer-Consumer Networks and the Size Distribution of Firms*. arXiv.physics/0507163v1 Julio de 2005.
- Day y Chen (1993): *Nonlinear dynamics and evolutionary economics*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Decker, E.M. (2000): *Self-Organizing Systems: a tutorial in Complexity*. Vivek 13.
- Delli Gatti, D.; Di Guilmi, C.; Gaffeo, E.; Giulioni, G.; Gallegati, M. y Palestrini, A. (2004): *Business cycle fluctuations and firm's size distributions dynamics*. *Advances in Complex Systems*, vol.7, nº 2, pp. 1-18.
- Deneubourg, J.L.; Aron, S.; Goss, S.; Pasteels, J.M. y Duerinck, G. (1986): *Random Behavior, Amplification Processes, and Number of Participants: How They Contribute to the Foraging Properties of Ants*. *Physica D*, vol.22, pp.176-186.
- Deneubourg, J.L. y Goss, S. (1989): *Collective Patterns and Decision-Making*. *Ethology, ecology, & Evolution*, vol.1, pp.295-311.
- Dunne, P. y Hughes, A. (1994): *Age, Size, Growth and Survival: UK Companies in the 1980s*. *Journal of Industrial Economics*, vol.42, nº 2, pp.309-314.

- Edgeworth, F.Y. (1967): *Mathematical Psychics. An Essay on the Application of Mathematics to Moral Sciences*. Augustus M. Kelly, Nueva York.
- Epstein, J.M. (1999): *Agent-based computational models and generative social science*. *Complexity* vol. 4, nº5, pp.41-60.
- Epstein, J.M. (2005): *Remarks on the foundations of Agent-Based Generative Social Science*. *CSED Working Paper* nº 41. The Brookings Institution.
- Epstein, J.M. y Axtell, R. (1996): *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Epstein, I.R.; Kustin, K.; De Kepper, P. y Orbán, M. (1990): *Reacciones químicas oscilantes*. En AA.VV. (1990): *Orden y Caos*. Prensa Científica, Barcelona.
- Erdős P. y Rényi A.(1960): *On the evolution of random graphs*. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci* nº5, pp. 17-60.
- Evans, D.(1987): *Tests of Alternative Theories of Firm Growth*. *Journal of Political Economy*, vol. 95, nº 4, pp. 657-674.
- Fariñas, J. C. y Moreno, L. (2000): *Firms growth, size and age: a nonparametric approach*. *Review of Industrial Organization*, vol.17 nº 3, pp. 249-265.
- Foster, J. (1993): *Economics and the self-organisation approach: Alfred Marshall Revisited?*. *The Economic Journal*, vol 102, nº 419, pp. 975-991.
- Foster, J. (1994): *The self-organisation approach in economics*. En Burley, S. y Foster, J. (eds): *Economics and Thermodynamics: New Perspectives on Economic Analysis*. Kluwer, Boston, pp.183-202.
- Foster, J. (1997): *The analytical foundations of evolutionary economics: from biological analogy to economic self-organisation*. *Structural Change and Economic Dynamics*, nº8, pp. 427-451.
- Fujita, M.; Krugman, P. y Venables, A.J. (2000): *Economía espacial*. Ariel, Barcelona.

- Gaffeo, E.; Gallegati, M.; Palestrini, A. (2003): “*On the size distribution of firms: additional evidence from the G7 countries*”. *Physica A*, nº324, pp. 117-123.
- Gallegati, M.; Delli Gatti, D.; Giulioni, G. y Palestrini, A (2003): *Financial Fragility, Pattern of Firms, Entry and Exit, and Aggregate Dynamics. Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 51, nº 1, pp. 79-97.
- García Olivares, A.R. (1988): *El concepto de cambio estructural en ciencias sociales. Revista Internacional de Sociología*, vol. 2, nº 46 , pp. 243-262.
- García Velarde, M.; Chacón, R. y Cuadros, F. (1991): *Caos determinista: el nuevo paradigma. Arbor CXXXVIII (543)*, pp.9-16.
- Gell-Mann, M. (2003): *El Quark y el jaguar. (Aventuras en lo simple y lo complejo)*. 4ª edición. Tusquets, Barcelona. [1ª edición 1995].
- Gibrat (1931): *Les Inegalites Economiques* . Librairie du Recueil. Sirey, Paris.
- Gilbert, N. y Troitzsch (2006): *Simulación para las ciencias Sociales. (Una guía práctica para explorar cuestiones sociales mediante el uso de simulaciones informáticas)*. McGraw-Hill. Segunda edición.
- Gini (1922): *Indici di Concentrazione e di Dipendenza. Biblioteca dell’Economista*, 5ª serie, Vol XX.
- Hahn, F. (1991): *The next hundred years. Economic Journal*, vol. 101, nº404, pp.47-50.
- Hall, B. H. (1987): *The Relationship Between Firm, Size and Firm Growth in the Manufacturing Sector. Journal. Industrial. Economic*, vol.3, nº4, pp.583-606.
- Hardin, G.J. (1980): *Promethean Ethics: Living with Death, Competition and Triade*. Washington University Press, St. Louis.
- Harris Dobkins L. y Ioannides, Y. M. (2001): *Spatial interactions among U.S. cities: 1900-1990. Regional Science and Urban Economics, Elsevier*, vol. 31(6), pages 701-731,



- Hart, P. y Prais, S. (1956): *The analysis of business concentration: a statistical approach*. *J. Royal Stat. Soc.* nº 119, pp. 150-191.
- Hart y Oulton (1999): *Internacional Journal of the Economics of Business*. Vol. 6, nº 2, pp.149-164.
- Hayek, F.A. (1997): *La fatal arrogancia. Los errores del socialismo*. En F.A. Hayek, *Obras Completas, Volumen I*. Unión Editorial, Madrid. [Edición original: (1988):“*The Fatal Conceit. The Errors of Socialism*. W.W. Bartley III como volumen de *The Collected Works of F.A. Hayek*. Routedge y University of Chicago Press]. Primera edición en español: Unión Editorial 1990.
- Hayles, N. K. (1990): *Chaos Bound: Orderly Disorder in Contemporary Literature and Science*. Ithaca, Cornell University Press.
- Hayles, K. (1993): *La evolución del caos. El orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas*. Gedisa, Barcelona.
- Hershkovits, M.J. (1948): *Man and His Works*. Ed. Alfred A. Knopf, Inc. Nueva York.
- Hershkovits, M.J. (1960): *Economic Anthropology, A Study in Comparative Arguments*. Ed. Alfred A. Knopf, Inc. Nueva York.
- Hofstadter, D. (1979): *Gödel, Escher, Bach: the Eterna golden Braid*. Basic books, New York.
- Holland, J. (1992): *Adaptation in natural and artificial systems*. Addison-Wesley, Cambridge, MA.
- Howard, J.H. (1982): *Darwin*. Oxford University Press, Oxford.
- Huhns, M. y Singh, P. (1998): *Readings in Agents*. Morgan Kauffman, San Mateo, CA.
- Ijiry, Y. y Simon, H. A. (1977): *Skew Distribution and the Sizes of Business Firms*. North Holland, Nueva York.
- Izquierdo, A.J. (1998): *El declive de los grandes números: Benoit Mandelbrot y la estadística social*. *Empiria* nº1, pp.51-84.

- Jacobs, J. (1961): *The Death and Life of the Great American Cities*. Vintage, Nueva York.
- Johnson, S. (2003): *Sistemas emergentes*. Turner, Fondo de Cultura Económica, México D.F. [Edición original: *Emergente. The Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software*, 2001. Free Press, Simon and Schuster Inc].
- Jou, D. y Llebot, J.E. (1989): *Introducción a la termodinámica de procesos biológicos*. Labor, Barcelona.
- Juarrero, A. (1999): *Dynamics in action*. MIT Press.
- Kaneko, K. (2003): *Organization through Intra-Inter Dynamics in Origination of Organismal Form: Beyond the Gene in Developmental and Evolutionary Biology*. En *The Vienna Series in Theoretical Biology*, G. Mueller y Newman, S. editores, MIT Press.
- Kapteyn, J. y van Uven, J. (1916): *Skew frequency curves in biology and statistics*. Hoitsema Brothers, Groningen.
- Kauffman, S.A. (1993): *The Origins of Order. Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press, Nueva York.
- Kauffman, S.A. (2003): *Investigaciones*. Tusquets, Barcelona. [Edición original: *Investigations*, Oxford University Press, 2000.].
- Knudsen, T. (2001): *Zipf law for cities and beyond*. *American Journal Economic and Sociology* nº 60, pp. 123-146.
- Krugman (1997): *La organización espontánea de la economía*. Antoni Bosch eds. [Edición original: *The Self-Organizing Economy*.: Blackwell Publishers, 1996, Cambridge MA].
- Langton C. G. (1986). *Studying Artificial Life with Cellular Automata*. *Physica, D*, 22, pp. 120-149.
- Leakey, R.E. (1981): *The Making of Mankind*. Dutton, Nueva York.
- Leiser, D. (1983): *Children's Conceptions of Economics. The Constitution of a Cognitive Domain*. *Journal of Economic Psychology*, vol.4, pp.297-317.

- Leonard, J.S. (1986): *On the Size distribution of Employment and Establishments. NBER Working Papers. National Bureau of Economic Research, Inc.* Cambridge, MA.
- Lewin, R. (1995): *Complejidad. El caos como generador del orden.* Tusquets Editores, Metatemas, Barcelona. [Edición original: *Complexity: Life at the Edge of Chaos.* MacMillan, New York.1992].
- Lorenz, E. N. (1993): *La esencia del caos.* Debate, Madrid.
- Mandelbrot, B. (1960): *The Pareto-Lévy Law and the Distribution of Income. International Economic Review*, nº1, p. 76-106.
- Mandelbrot, B. (1961): *Stable Paretian Random Functions and the Multiplicative Variation of Income. Econométrica* nº29, pp. 517-543. :
- Mandelbrot, B. (1963): *The Variation of Certain Speculative Prices.* Journal of Business nº36 (Octubre) [reproducido en P. Cootner (ed), *The Random Character of Stock Market Prices*, MIT Press, Cambridge, MA: pp.307-332].
- Mandelbrot, B. (1973): *Le syndrome de la variance infinie et ses rapports avec la discontinuité des prix. Economie appliquée* nº36, p.321-348.
- Mandelbrot, B. (1982, 1997): *La geometría fractal de la naturaleza.* Tusquets, Barcelona.
- Mandelbrot, B. (1985): *Interview with Benoît Mandelbrot.* En D.J. Albers y G. L. Alexanderson (eds), *Mathematical People. Profiles and Interviews*, Cambridge, MA: Birkhauser pp. 207-25.
- Mandelbrot, B. (1986): *Cómo descubrí los fractales, entrevista con Benoît Mandelbrot. Mundo Científico*, nº 58, pp. 576-580.
- Mandelbrot, B. (1987): *Los objetos fractales.* Tusquets, Barcelona.
- Mansfield, E. (1962): *Entry, Gilbrat's Law, innovation, and the Growth of firms. American Economic Review*, vol 52, nº 2.
- Mansilla, R. (2003): *Una breve introducción a la econofísica.* Equipo Sirius, Madrid.

- Margalef, R. (1968). *Perspectives in Ecological Theory*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.
- Margalef, R. (1974). *Ecología*. Omega, Barcelona.
- Marshall, A. (1948): *Principios de Economía*. M. Aguilar, Madrid. [Edición original: “*Principles of Economics*” 1890. Ed. MacMillan and Co, Londres.].
- Mayntz, R. (2002): *Modelos científicos, teoría sociológica y el problema macro-micro*. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas (REIS)*, nº 98, pp. 65-78.
- Menger, C. (1996): *Investigations into the method of the social sciences*. Libertarian Press, Grove City. Edición original 1883.
- Menger, C. (1997): *Principios de Economía Política*. Unión Editorial, Madrid.
- Metcalfe, J.S. (1999): *Restless Capitalism: Increasing Returns and Growth in Enterprise Economics*. CRIC Universidad de Manchester. WP nº4.
- Miramontes, O.; Solé, R. y Goodwin, B.C. (1993): *Collective Behaviour of Random-Activated Mobile Cellular Automata*. *Physica D*, nº63, pp.145-160
- Montoya, J.M., Solé, R.V. y Rodríguez, M.A. (2001): *La arquitectura de la naturaleza: complejidad y fractalidad en redes ecológicas*. *Ecosistemas* Año X, nº 2, Mayo-Agosto.
- Morin, E. (1997): *La naturaleza de la naturaleza*. 4º edición. Cátedra, Madrid. La primera edición en castellano es de 1977.
- Morin, E. (2001): *La mente bien ordenada*. Seix Barrall, Barcelona.
- Nicolis, G. y Prigogine, I. (1977): *Self-organization in non-equilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations*. Wiley-Interscience, Nueva York.
- Nicolis, G. y Prigogine, I. (1987): *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. Alianza, Madrid.
- Nuñez, L. y Romero, C. (2003): *Pensar la educación. Conceptos y opciones fundamentales*. Pirámide, Madrid.

- Okuyama, K. ; Takayasu, M.; Takayasu, H.: (1999): “Zipf’s law in income distribution of companies”. *Physica A* n° 269, pp. 125-131.
- Packard, N.H. (1988): *Adaptation toward the edge of chaos*. En Kelso, J.A.S., Mandell, A.J. y Shlesinger editors: *Patters in Complex Systems*, pp.293-301, World Scientific.
- Pareto, V. (1896): *Cours d’économie politique*. Reeditado como un volumen de *Ouvres Complètes*. Ed. Droz, Ginebra.
- Pirenne (1934): *Histoire des institutions et du droit privé de l’ancienne Egypte*. Bruselas, edición de la Fondation Egyptologique Reine Elisabeth.
- Prigogine, I. (1972): *La Thermodynamique de la Vie. La Recherche* 24, pp.547-562.
- Prigogine, I. (1980): *From being to becoming. Time and complexity in the physical sciences*. W. H. Freeman and Company, Nueva York.
- Prigogine, I.(1982, 1988).*¿Tan sólo una ilusión?. Una exploración del caos al orden* Tusquets Editores.
- Prigogine, I. (1986): *Enfrentándose con lo irracional*. En Jorge Wagensberg (Ed.): *Proceso al azar*. Tusquets, Barcelona.
- Prigogine, I. y Stengers, I. (1975): *Naturaleza y creatividad*. En Prigogine (1983): *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al Orden*. Tusquets, Barcelona.
- Prigogine, I. y Stengers, I. (1979): *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Alianza, Madrid.
- Ramsden, J.J. y Kiss-Haypál, G. (2000): *Company size distribution in different countries*. *Physica A* . n° 277, pp. 220-227.
- Resnick, M. (1997): *Turtles, termites, and traffic jams. Explorations in massively parallel microworlds*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Richiardi, M. (2003): *On the use of agent-based simulations*. LABORatorio R. Revelli, Centre for Employment Studies, Turin. Diciembre.

- Richiardi, M (2004): *Generalizing Gibrat: Reasonable Multiplicative Models of Firm Dynamics*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol.7, nº1.
- Rodríguez, A. y Vara, O. (2003): *El concepto de autoorganización en Carl Menger y Friedrich A. Hayek*. Incluido en *Procesos de Autoorganización*, capítulo 6. Coordinadores: Rubio de Urquía, R.; Vázquez, F.J.; y Muñoz, F.F., Unión Editorial, Madrid.
- Ruelle, D. (1993): *Azar y Caos*. Alianza, Madrid.
- Salas, V. (1987): *Sobre el concepto de empresa para el estudio de la organización de la industria*. *Información Comercial Española*, octubre.
- Sargent (1993): *Bounded rationality in macroeconomics*. The Arne Ryde Memorial Lectures., Clarendon Press, Oxford, UK.
- Saura, D. (2002): *No linealidad y economía austriaca*. *Rev. Econ. Ros.* 5 (2), pp.177-204.
- Saura, D. (2003): *Autoorganización en economía: una aproximación desde la economía evolutiva*. Incluido en *Procesos de Autoorganización*, capítulo 7. Coordinadores: Rubio de Urquía, R.; Vázquez, F.J.; y Muñoz, F.F. (2003), Unión Editorial, Madrid.
- Schelling, T. C. (1971): *Dynamic Models of Segregation*. *Journal of Mathematical Sociology*, vol.1, pp 143-186.
- Schelling, T.C. (1989): *Micromotivos y macroconducta*. Fondo de Cultura Económica. [Edición original: (1978) *Micromotives and Macrobehavior*. W.W. Norton & Company, Inc., Nueva York].
- Scholz, C.H. (1982): *Scaling laws for large earthquakes and consequences for physical models*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, nº72, pp. 1-14.
- Schumpeter, J.A. (1967): *Grandes economistas: de Marx a Keynes*. Alianza Editorial, Madrid.
- Silvester, T (2002): Regression and Barabasi's Law. En: [www.questinstitute.co.uk/dynamic/resources/Regression\\_and\\_Barabasi.pdf](http://www.questinstitute.co.uk/dynamic/resources/Regression_and_Barabasi.pdf)

- Simon, H (1955): *On a Class of Skew Distributions Functions*. *Biométrica* nº52, pp.425-440.
- Simon, H. y Bonini, C. (1958): *The size distributions of business firms*. *American Economic Review* nº48, pp. 607-617.
- Simon, H. A. (1969): *Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Simon, H.A. (1982): *Models of Bounded Rationality*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Simon, H.A. (1987): *Rationality in Psychology and Economics*. En R.M. Hogarth y M.W. Reder, eds: *Rational Choice: The Contrast Between Economics and Psychology*, University of Chicago Press, Chicago.
- Singh, A. y Whittington, G. (1975): *The Size Distribution of Business Firms*. *American Economic Review*, nº. 48, pp. 607 – 617.
- Smith, A. (1776, 1976): *An Inquiri into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. Oxford: Oxford University Press.
- Solé, R. y Manrubia, S.C (1996): *Orden y caos en sistemas complejos*. Ediciones UPC, Barcelona.
- Stanley, M.H.R.; Buldyrev, S.V.; Mantegna, R.; Havlin S.; Salinger, M.A. and Stanley H.E. (1995): *Zipf plots and the size distribution of firms*. *Economics Letters* nº 49. pp. 453-457.
- Stanley, H.E.; Amaral, L.A.N.; Gopokrishnan, P. y Plerou, V. (2000): *Scale invariance and universality of economic fluctuations*. *Physica A*, nº 283, pp. 31-41
- Stewart, I. (1989): *¿Juega Dios a los dados?* Drakontos, Barcelona.
- Stewart, (2001): *The coevolving organization. Poised between order and chaos*. Decomplexity Associates Ltd.
- Sutton, J. (1997): *Gibrat's Legacy*. *Journal of Economic Literature*, vol. XXXV. pp. 40-59.
- Taber, C.S. y Timpone, R.J. (1996): *Computacional modeling. Quantitative applications in the social sciences* 113. Sage, Thousand Oaks; London.

- Tesfatsion, L. (2001): *Agent-Based computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up*. ISU Economics Working Paper n° 1. Departamento de Economía, Universidad Estatal de Iowa. Ames, Iowa. Este trabajo explica de forma más amplia los conceptos desarrollados en: Tesfatsion, L. (2001): *Guest Editorial: Agent-Based Modelling of Evolutionary Economics Systems*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, n°5.
- Tesfatsion, L. (2003): *Agent-Based Computational Economics*. ISU Economics Working Paper n°1.
- Turing, A. (1952): *The chemical basis of morphogenesis*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 237, pp.37–72.
- Vázquez, F.J. (2003): *Una aproximación a la teoría de las bifurcaciones y a las dinámicas caóticas*. Incluido en *Procesos de Autoorganización*, capítulo 4. Coordinadores: Rubio de Urquía, R. ;Vázquez, F.J.; y Muñoz, F.F. (2003), Unión Editorial, Madrid.
- Wagensberg, J. (Ed) (1986): *Proceso al azar*. Tusquets, Barcelona.
- Waldrop, M.M. (1992): *Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos*. Simon & Schuster. Nueva York.
- Watts D.J., y Strogatz, S.H. (1998): *Collective dynamics of “small-world” networks*. *Nature*, n°393 pp. 440-442.
- Weaver, W. (1948): *Science and Complexity*. *American Scientist*, n° 36, p.536.
- Wilensky, U. (1998): *NetLogo Segregation model*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Evanston, IL, Northwestern University. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Segregation>.
- Wilensky, U. (1998): *Netlogo Wealth Distribution model*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Evanston, IL, Northwestern University. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WealthDistribution>.



*Referencias bibliográficas*

- Wilensky, U. (2005). *NetLogo Giant Component model*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Evanston, IL, Northwestern University.  
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/GiantComponent>.
- Wilensky, U (2005): *Netlogo Preferential Attachment model*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Evanston, IL, Northwestern University.  
[http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Prefferential Attachement](http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Prefferential%20Attachement).
- Wooldridge, M. y Jennings, N.R. (1995) : *Intelligents agents : Theory and practice*. *Knowledge Engineering Review* nº10, pp. 115-152.
- Zipf G.K. (1932): *Selective Studies and the Principle of Relative Frequency in Language*.
- Zipf, G.K. (1935): *Psycho-Biology of Languages*. Boston, Houghton Mifflin.
- Zipf, G.K. (1949,1972): *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Addison-Wesley Press Inc., Nueva York.