



Reis. Revista Española de Investigaciones
Sociológicas
ISSN: 0210-5233
consejo.editorial@cis.es
Centro de Investigaciones Sociológicas
España

Pomata Varó, Pedro Antonio; Pérez Herranz, Fernando Miguel; Úbeda García, José Ignacio; Iñesta Quereda, José Manuel

La propagación del conocimiento científico: un modelo fractal

Reis. Revista Española de Investigaciones Sociológicas, núm. 115, 2006, pp. 41-67

Centro de Investigaciones Sociológicas
Madrid, España

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99715243002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

La propagación del conocimiento científico: un modelo fractal

The propagation of scientific knowledge: a fractal model

Pedro Antonio Pomata Varó

IES Virgen del Remedio de Alicante

pa.pomata@telefonica.net

Fernando Miguel Pérez Herranz

Universidad de Alicante

Perez.Herranz@ua.es

José Ignacio Úbeda García

Universidad de Alicante

jiug@ua.es

José Manuel Iñesta Quereda

Universidad de Alicante

inesta@dlsi.ua.es

Palabras clave: Propagación de la Ciencia, Fractal, Sociología de la Ciencia, Thomas S. Kuhn, Filosofía de la Ciencia.

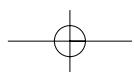
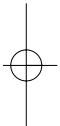
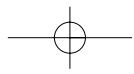
Keywords: Propagation of Science, Fractal, Sociology of Science, Thomas S. Kuhn, Philosophy of Science.

RESUMEN

En este trabajo se propone un modelo fractal —la herramienta matemática empleada por Mandelbrot en el estudio de fenómenos naturales de nuestro entorno— para dar cuenta de la propagación de la ciencia desde una nueva perspectiva, lo que nos permite extraer algunas consecuencias sobre un capítulo de la epistemología de gran repercusión a partir de la proyección del libro de Kuhn *La estructura de las revoluciones científicas* (1962): la transmisión, aceptación y estabilización del conocimiento científico.

ABSTRACT

This essay presents a fractal model —the mathematical key used by Mandelbrot in the study of natural phenomena surrounding us— in order to design a new image of the propagation of science. Our model leads to some conclusions about an interesting chapter of epistemology, using the strong influence of Kuhn's book *The Structure of Scientific Revolutions* (1962), on the transmission, acceptance and stability of scientific knowledge.



1. INTRODUCCIÓN

Es tópico ya referirse a nuestro tiempo como «época de la información». Todo lo que se hace, piensa, siente, imagina o fantasea se ha de incorporar a los flujos informativos encauzados por los medios audiovisuales —entre los que la televisión es campeona—, hasta haber conseguido una empresa digna del alquimista: la transmutación de la realidad en información. Un nuevo principio ontológico domina las sociedades humanas: sólo adquieren existencia las personas, los sucesos o las obras que se presentan en los medios de información. O, dicho *a contrario*, si un individuo, acontecimiento o producto no es recogido por los medios de información, no existe.

Intelectuales y profesores se encuentran ante la avalancha informativa como los campesinos castellonenses ante la plaga de estorninos, los médicos del decenio de los ochenta ante la epidemia del SIDA o los bomberos neoyorquinos ante el incendio de las torres gemelas del *World Trade Center*: pájaros, virus o llamas se propagan sin que quepa hacer otra cosa que resignarse. Los profesionales de la enseñanza quizá deberíamos aprender de estos agricultores, médicos o bomberos que experimentan con fenómenos que necesitarían tanta energía para ser anulados que sólo cabe esperar a que el lugar afectado quede saturado y alcance su límite por sí mismo. ¿No será, entonces, que ciertas entidades (E_X) se propagan obedeciendo a normas y leyes universales (L_{EX}), y que la transmisión de conocimientos obedece también a estos ritmos? ¿Acaso la propagación de ideas y creencias se mueve según normas establecidas a las que poco afecta su voluntad? Y, más específicamente: ¿la transmisión del saber científico es independiente de las voluntades del personal docente e investigador?

En todo caso, no parece que la ciencia nazca por generación espontánea, sino que se va constituyendo a medida que se fundan instituciones, se adquieren nuevos conocimientos, se transmiten lenguajes específicos, fórmulas, habilidades operativas, etc. Pero no todos los estudiosos de la ciencia están de acuerdo en la naturaleza de ese proceso. Hay quienes consideran que el avance de la ciencia es fruto del trabajo de una mayoría de científicos que preparan el camino, con sus pequeños descubrimientos, a los científicos de ingenio. Otros consideran que es fruto del trabajo de una minoría: más del cincuenta por ciento de los artículos científicos han sido producidos por tan sólo el diez por ciento de los científicos. La primera hipótesis es conocida como «hipótesis Ortega», y la segunda, como «hipótesis Lotka-Price»¹ (cf. R. Cole y S. Cole, 1972). Ambas hipótesis bibliométricas están de acuerdo en que la ciencia progresá porque el antiguo conocimiento engendra el nuevo y

¹ Otra cosa es que la asociación entre las teorías y los pensadores que les dan nombre esté bien traída. Véase Agenjo (2002).

PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

defienden que la «vieja ciencia» se transforma en «nueva ciencia» mediante un proceso acumulativo.

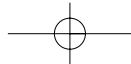
En oposición a este planteamiento, otros investigadores niegan el carácter acumulativo del progreso científico y defienden la existencia de momentos singulares y cualitativos que suponen una «revolución», una situación de ruptura con el conocimiento anterior y propician el progreso científico. Pero las divergencias entre los investigadores no acaban aquí.

Hasta el decenio de los sesenta no se empezó a poner en duda que la actividad científica consistía en reunir datos, explicarlos mediante la elaboración de hipótesis teóricas sencillas, realizar experimentos y progresar racionalmente hacia la verdad. La elección entre teorías científicas alternativas se contemplaba como una actividad gobernada por principios autónomos, universales y neutrales, lo que otorgaría a la práctica científica una función exclusivamente normativa: es posible establecer una serie de reglas metodológicas que al ser puestas en práctica permiten al científico optar entre teorías rivales.

En la actualidad, aunque hay investigadores que siguen enfocando su trabajo en la búsqueda de esas reglas y principios que permiten evaluar objetivamente las teorías en competencia, la mayoría ha incorporado aspectos sociológicos e históricos al estudio de la práctica científica y defiende la imposibilidad de formular con precisión las reglas que permiten a los científicos decidir con total acuerdo la aceptación o rechazo de una teoría.

¿Existen o no estas reglas metodológicas que guían al científico en la validación de una teoría? Si existen, e independientemente de cuáles sean, el problema de aceptación y rechazo de una teoría —y con él la forma en que se propaga el conocimiento científico— quedaría teóricamente resuelto una vez fijado el conjunto de normas que se van a aplicar. Si no existe ese conjunto de reglas comunes a todos los científicos y cada uno puede aplicar las suyas propias, ¿se deduce de ello que la actividad científica resulta una empresa irracional o tendría aún sentido hablar de racionalidad científica? Y si es así, ¿cómo debería entenderse y a quién debería aplicarse esta racionalidad? Si los científicos individuales pueden aceptar una teoría por toda clase de razones y en la mayoría de los casos por varias al mismo tiempo, ¿significa que cuando la comunidad científica acepta o rechaza una teoría lo hace al azar o por puro capricho? ¿Puede la comunidad científica validar una teoría mientras los científicos individuales siguen discrepando abiertamente entre sí? ¿Qué condiciones deben cumplirse para poder afirmar que la comunidad científica acepta como propia una teoría? ¿Qué notas caracterizan el concepto de ciencia?...

En este trabajo se propone un modelo formal —al que denominamos IN EXTENSIS— para dar cuenta de un fenómeno social: la propagación del conocimiento científico. A la vez, IN



LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

EXTENSIS nos permitirá interpretar desde la perspectiva de los Sistemas Dinámicos Complexos algunas de las ideas y conceptos fundamentales expuestos por Thomas S. Kuhn en su ya clásica obra *La estructura de las revoluciones científicas*.

2. UN MODELO FRACTAL PARA LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

2.1. *El sistema*

Definición: Dado el conjunto X y el conjunto de enlaces $E \subseteq X \times X$ se define el *grafo* $G = (X, E)$ de manera que cada nodo $x \in X$ represente a un científico y E a los enlaces establecidos entre ellos. Dadas dos teorías científicas en competencia, T y T' , se admite que un científico cualquiera apoye la teoría T' con probabilidad $p \in [0,1]$ y la teoría T con probabilidad $q = 1 - p$. Considérese el sistema formado por el par (G, p) .

Condiciones iniciales del sistema: El estudio del sistema se inicia en el momento en que se presentan en sociedad dos teorías rivales. Esta situación se genera con frecuencia cuando la teoría en vigor, T , fracasa en su esfuerzo por resolver algún problema importante. La persistencia en el fracaso termina por causar una crisis en la disciplina correspondiente. Si la teoría T no consigue solventar las dificultades encontradas, algunos científicos (o, quizás, uno sólo) buscan soluciones a los problemas surgidos y proponen una nueva teoría T' . En un primer momento, la nueva teoría alternativa T' no se encuentra suficientemente desarrollada y las respuestas que ofrece sólo afectan a una parte de los nuevos problemas a los que se enfrenta, y no siempre de modo satisfactorio. No obstante, empieza tímidamente a llamar la atención de otros científicos y gana los primeros adeptos. En estos primeros momentos el valor de p se encuentra próximo a cero.

Dinámica del sistema: El valor de p no permanece fijo ni está predeterminado. Se acepta, por hipótesis, que varía con el tiempo. Al estudiar la evolución del sistema cuando p aumenta paulatinamente su valor, el sistema pasa por sucesivas etapas o *futuros*: en una primera etapa, los valores de p son pequeños y el desorden del sistema es mínimo; mas, a medida que crece el valor de p , el desorden aumenta poco a poco hasta que llega un momento en el que el sistema fluctúa cada vez de forma más acusada y adquiere un estado completamente desordenado (en el caso que nos ocupa, en torno a $p = 0,5$).

Como la evolución del sistema está guiada por las elecciones realizadas por los científicos individuales —que apoyan o bien T o bien T' —, y las teorías se aceptan en función del valor asignado a p , el sistema alcanza los sucesivos *futuros puntuales* sin que éstos sean

predecibles y, lo que es más significativo, sin encontrarse claramente identificados los criterios de evaluación que los han producido; por lo que resulta coherente y consistente con el sistema propuesto referirse a ellos como *factores co-determinantes*: un extenso y complejo conjunto de factores, interrelacionados entre sí, con la característica común de que ninguno de ellos resulta por sí solo concluyente a la hora de que un científico efectúe su elección. El sistema evoluciona, pues, guiado por la probabilidad p , o, lo que es equivalente, conducido por los factores co-determinantes, que son los que realmente influyen en la elección individual de cada científico.

Estado final del sistema: El sistema alcanza su estado final cuando aparece el *agregado infinito de percolación*² y, en consecuencia, el sistema se ordena. Es entonces cuando decimos que la comunidad científica acepta la nueva teoría T ³.

Este sistema, que posee ya de entrada algunas características adaptadas a la propagación del conocimiento científico y es capaz de encarar también el estudio de otros fenómenos sociales, dará paso en el apartado siguiente al modelo IN EXTENSIS, una vez que se define el conjunto de enlaces E .

2.2. IN EXTENSIS

Un grafo está formado por un conjunto X , cuyos elementos reciben el nombre de *nodos*, y un conjunto $E = \{(x, y) : x, y \in X\} \subseteq X^2$ de pares de nodos, llamado *conjunto de enlaces*, de modo que: $\forall (x, y) \in E : (y, x) \in E$.

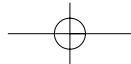
De entre todos los tipos de grafos que pueden construirse, se seleccionan aquellos que poseen como característica que cada nodo tiene un número finito de enlaces:

$$\forall x \in X : \text{Card} \{y \in X : (x, y) \in E\} < \omega$$

En concreto, se toma $X = \mathbb{Z}^2$, de manera que cada nodo se encuentra representado por un punto del plano con ambas coordenadas enteras.

² Puede consultarse el Glosario al final del artículo.

³ El sistema propuesto se inscribe dentro de toda una serie de desarrollos teóricos que utilizan la teoría de la percolación, los fractales y los sistemas dinámicos como elemento explicativo de un amplio conjunto de fenómenos centrados en la propagación, incluyendo en ellos algunos fenómenos sociales como percolación social y redes no homogéneas (Abhijit Kar Gupta y Dietrich Stauffer), percolación y elección social (Gerard Weisbuch, Sorin Solomon, Lucilla de Arcangelis, Naeem Jan y Dietrich Stauffer), fractales y crecimiento urbano (Hernán Alejandro Makse, Shlomo Havlin y Eugene Stanley), bibliometría y sistemas dinámicos (M. V. Simkin y V. P. Roychowdhury), percolación y terrorismo (Serge Galam y E. Ahmed)...



LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

Después, se define la distancia entre dos nodos $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{Z}^2$, $y = (y_1, y_2) \in \mathbb{Z}^2$, según la fórmula:

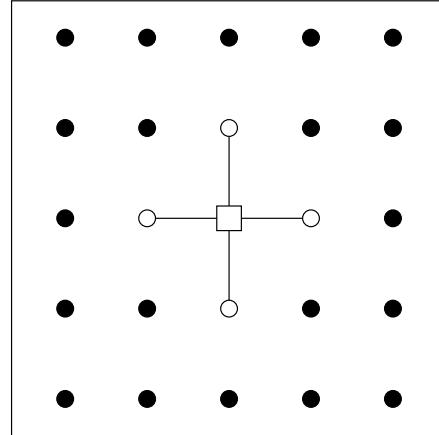
$$\delta(x, y) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2|$$

Y, finalmente, se define el conjunto de enlaces:

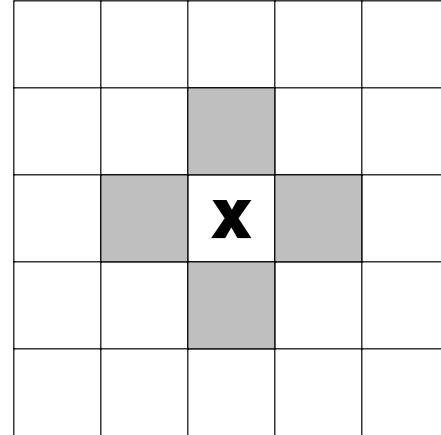
$$E = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^2 \times \mathbb{Z}^2 : \delta(x, y) = 1\}$$

Con esta caracterización, un nodo cualquiera queda enlazado con otros cuatro nodos. En el GRAFO-1, el nodo simbolizado por un cuadrado se conecta con los círculos blancos. El enlace entre nodos está representado por el segmento que los une. No se introduce ninguna diferencia en el modelo propuesto si se sustituyen los nodos por cuadrados de lado unidad y se considera que un cuadrado (señalizado con una cruz) puede enlazarse con otros cuatro (sombreados), tal y como indica el GRAFO-2.

GRAFO-1

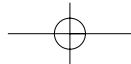


GRAFO-2



Dado el grafo $G = (X, E)$ y un nodo $x \in X$, se define el *conjunto de nodos en contacto con x* como el subconjunto $C(x)$ que cumple las condiciones:

$$\begin{cases} x \in C(x) \\ z \in C(x) \wedge (z, y) \in E \Rightarrow y \in C(x) \end{cases}$$



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

Se dice que el par (Y, A) es un *subgrafo* de (X, E) si y sólo si:

$$Y \subseteq X \text{ y } A \subseteq E \cap (Y \times Y)$$

Un subgrafo (Y, A) forma un *agregado* o *cluster* si y sólo si todos sus puntos están en contacto: $\forall y \in Y: Y = C(y)$

Considérense ahora los subgrafos (Y, A) e (Y', A') de modo que: $Y' = X - Y$, y asígnese a cada nodo $x \in X$ la probabilidad p de que $x \in Y'$. Una vez distribuidos entre Y e Y' los nodos de X de acuerdo con el valor asignado a p , quedan establecidos los subconjuntos Y e Y' y los enlaces correspondientes en cada uno de ellos: $A = E \cap (Y \times Y)$, $A' = E \cap (Y' \times Y')$.

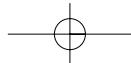
Pues bien, la modelización que proponemos para el estudio de la propagación de una teoría en el seno de la comunidad científica es la siguiente:

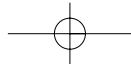
Cada científico está representado por un nodo de Z^2 . Dado un valor de la probabilidad p y dadas dos teorías científicas en competencia T y T' , suponemos que todos los científicos hacen su elección y que un científico cualquiera puede apoyar sólo una de las dos teorías: apoyará T con probabilidad $1 - p$ o T' con probabilidad p . De esta manera, los científicos quedan repartidos en dos subgrafos: (Y, A) e (Y', A') . El subconjunto de científicos que apoya la teoría T está representado por el subgrafo (Y, A) , y el de los científicos que apoya la teoría T' por el subgrafo (Y', A') .

Decimos que la teoría T' logra imponerse sobre su rival y ser aceptada por la comunidad científica si y sólo si aparece el *agregado infinito de percolación*:

$$\exists y' \in Y': \text{Card } C(y') = \omega$$

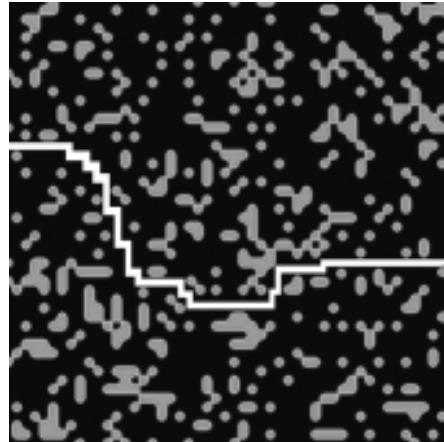
Es, pues, suficiente que de todos los agregados formados exista uno que atraviese de parte a parte (*percole*) la malla; es decir, que exista al menos un «camino» que atraviese toda la red. Convendremos en adelante en ligar el «gris oscuro» a la nueva teoría T' y el «gris claro» a su competidora T . El GRAFO-3 sirve como ejemplo para simbolizar la aceptación de la teoría T' en el seno de la comunidad científica: una malla (50×50) en la que percolan las casillas «gris oscuro» y en la que puede apreciarse un «camino» (en color blanco) que la atraviesa.





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

GRAFO-3



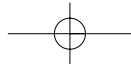
Para evitar confusiones es preciso distinguir entre dos aspectos: la aceptación o rechazo de una teoría por cada científico individual y la aceptación o no de la teoría por parte de la comunidad científica. El primero de ellos ya ha sido contemplado en el sistema y depende de los valores de p y q . Ahora bien, ¿de qué depende que la comunidad científica acepte como válida una teoría?, o, lo que es equivalente, ¿qué probabilidad existe de que aparezca el agregado infinito de percolación?

La respuesta nos la proporciona la teoría de la percolación por la que se conoce que la probabilidad P de que aparezca el agregado de percolación valdrá 0 ó 1 debido a la ley cero-uno de *Kolmogorov*. Y, dado que es creciente, tomará el valor 0 por debajo de un valor crítico (p_c) y 1 por encima de dicho valor. Es ésta la razón por la que se dice que el tipo de fenómeno estudiado funciona según una ley «todo o nada»:

$$P = \begin{cases} 0 & \text{si } p < p_c \\ 1 & \text{si } p > p_c \end{cases}$$

Representamos por p_c la *probabilidad de percolación* o *probabilidad umbral*: el valor ínfimo de p para el que la probabilidad P es igual a 1.

La probabilidad p añade, pues, a las partes aisladas del sistema (científicos individuales), mientras que la probabilidad P hace referencia a la totalidad del conjunto (comunidad científica).



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

De esta manera, la elección efectuada por cada científico individual —que se desconoce de forma local y puntual— y la llevada a cabo por la comunidad científica quedan relacionadas en la función obtenida a través de sus probabilidades, estableciéndose una relación no determinista entre las partes y el todo.

En el modelo propuesto el valor de la probabilidad umbral es $p_c = 0,5927\dots$, lo que nos indica que es suficiente con que algo menos del 60% de los científicos se decante por la teoría T' para que la comunidad científica adopte dicha teoría con probabilidad 1. No es, pues, necesario que exista unanimidad en las elecciones efectuadas por los científicos individuales. Es más, ni siquiera resulta imprescindible que los dos tipos de *clusters* —«gris oscuro», «gris claro»— produzcan sobre el conjunto una partición desproporcionada del tipo: 90% –10%, 80% –20% ó 70% –30%.

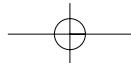
Como se ha indicado, para un valor dado de p los científicos quedan repartidos en dos subgrafos (Y, A) e (Y', A') según apoyen la teoría T o T' . La formación de cada uno de estos subgrafos no es única: de hecho, aunque en la representación gráfica del modelo se utilizan mallas finitas, en (Z^2, E) se pueden formar infinitas parejas distintas de agregados para un mismo valor de p . Esto se debe a que en la repartición que origina (Y, A) e (Y', A') , la única condición que debe satisfacerse es que la proporción global de celdas «gris oscuro» sea p y la de celdas «gris claro» $1 - p$. Esta característica introduce un elemento de aleatoriedad en la formación de los subgrafos, que *no afecta a la manifestación de sus propiedades*: el modelo matemático indica que la aparición o no aparición del agregado de percolación depende del valor de p y no de los detalles de la estructura —la distribución pormenorizada en el agregado de sus nodos y enlaces—.

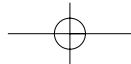
En el *umbral de percolación* ($p = p_c$), el agregado infinito de percolación es un *objeto fractal* de dimensión $D = 91/48$ ($\approx 1,89$). Para longitudes de escala suficientemente pequeñas, el fractal tiene una estructura *estadísticamente autosemejante*: una copia reducida tiene el mismo comportamiento estadístico que el original.

2.3. *Las cuatro etapas de IN EXTENSIS*

En el proceso de evolución de IN EXTENSIS se pueden distinguir cuatro etapas fundamentales. En cada una de ellas se ha elegido un valor significativo de p que sirve de ejemplo para representar gráficamente el fractal⁴ (ver IN EXTENSIS EN DOS DIMENSIONES):

⁴ Para cada valor de p , la repartición en una malla (50×50) de las casillas en dos categorías, «gris oscuro» y «gris claro», se ha realizado mediante un programa implementado por los autores que genera números aleatorios x entre 0 y 1, de manera que si $x > p$ se asigna a la casilla una categoría y , en caso contrario, se le asigna la otra, siempre siguiendo el criterio de aso-



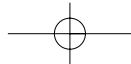


LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

- A) $p = 0,2 < p_c$, $q = 0,8 > p_c$: El sistema se encuentra en una de sus primeras etapas, en donde aún continúa vigente la teoría T.
- B) $p = 0,5 < p_c$, $q = 0,5 < p_c$: El sistema evoluciona hacia una situación en la que ninguna de las dos teorías logra imponerse definitivamente y el sistema permanece en completo desorden.
- C) $p = 0,6 > p_c$, $q = 0,4 < p_c$: El sistema poco después de alcanzar un punto crítico en el que la teoría T' sustituye a la antigua T.
- D) $p = 0,8 > p_c$, $q = 0,2 < p_c$: Etapa de evolución del sistema en donde la teoría T' se extiende por la comunidad científica y queda consolidada.

En los primeros momentos en que la teoría T' sustituye a T como nueva teoría vigente (estado del sistema representado por la etapa C) aún sigue existiendo un importante porcentaje de científicos (40%) que favorecen la antigua teoría, lo cual hace posible que la comunidad científica acepte como propia una teoría, aunque los científicos individuales sigan enfrentados entre ellos y continúen discrepando abiertamente entre sí. Pero una vez que T' empieza a aparecer con mayor asiduidad en revistas especializadas y libros de texto, se explica en los centros de enseñanza (escuelas, institutos, universidades...) y se normaliza su transmisión —junto a otros factores, como la paulatina desaparición física de sus oponentes y la nueva incorporación de científicos que se forman familiarizados con ella—, el valor de p continúa creciendo y la nueva teoría acaba por extenderse plenamente en la comunidad científica (estado del sistema representado por la etapa D).

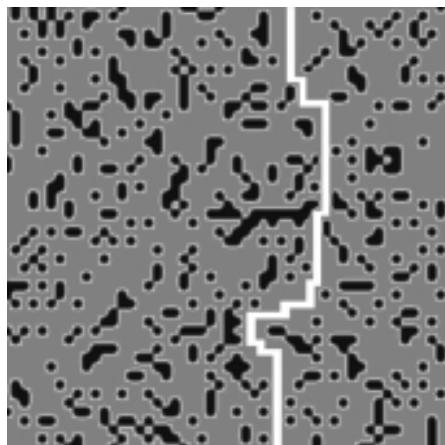
ciar la categoría «gris oscuro» a la nueva teoría T' y la «gris claro» a la antigua teoría T. La representación gráfica de los datos se ha llevado a cabo mediante el uso del sistema SigmaPlot 8.0, con un posterior tratamiento de los colores para marcar las diferencias entre las categorías y enfatizar el recorrido del «camino».



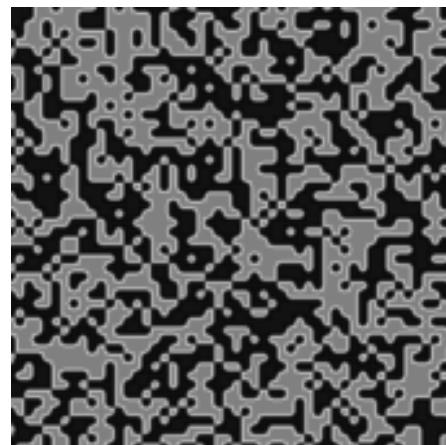
PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

IN EXTENSIS EN DOS DIMENSIONES

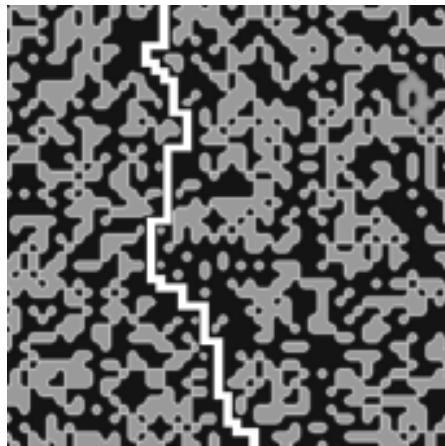
Etapa A



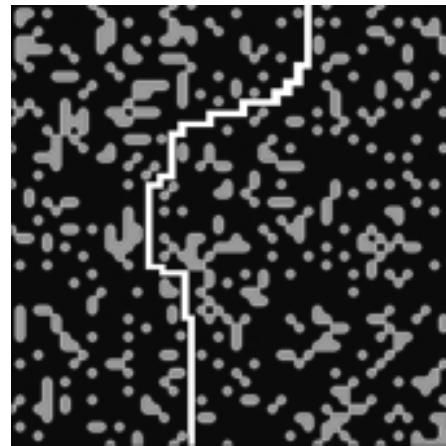
Etapa B



Etapa C



Etapa D



Por lo tanto, una vez que p sobrepasa el valor de p_c , el sistema evoluciona imparablemente hacia un estado de consolidación plena de T' ⁵. En la evolución de IN EXTENSIS, cualquie-

⁵ En el proceso de propagación de la nueva teoría T' —en concreto, el producido en el periodo de amplia expansión de la teoría (etapa D)—puede adquirir relevancia el fenómeno social conocido como *efecto bandwagon*, que encuentra también apli-





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

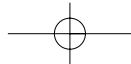
ra de las tres primeras etapas puede alcanzarse o no en función del valor que tome la probabilidad p ; pero una vez alcanzada la etapa C, el sistema avanza irremisiblemente hacia la etapa D, por lo que puede decirse que el paso de la etapa C a la D no puede ser detenido. El punto crítico del sistema viene dado por el valor de la probabilidad umbral p_c , a partir del cual, *a/ea iacta est*.

Para realizar una representación gráfica en tres dimensiones de estas etapas, convendremos en situar —ver IN EXTENSIS EN TRES DIMENSIONES— las casillas «gris oscuro» y «gris claro» en dos niveles distintos: «0» y «1», añadiendo en las etapas A, C y D un tercer nivel: «-1», para representar el «camino» elegido en el agregado de percolación. De esta forma, el que una teoría logre imponerse sobre su competidora y sea aceptada por la comunidad científica se representa simbólicamente por la existencia de un camino que logra atravesar de una parte a otra la zona orográfica en relieve.

3. UN EJEMPLO DEL MODELO FRACTAL

Para ejemplificar el modelo propuesto recurrimos a una variante del llamado «problema de la ciencia en España»: el retraso experimentado durante la monarquía de los Austrias en la aceptación de las nuevas teorías científicas con respecto a otros países europeos como Inglaterra, Francia o Alemania. ¿Por qué la España de la época, que domina militar, política y económicamente gran parte del mundo, fue sobrepasada en el conocimiento científico, uno de los presupuestos que hicieron posible su poder? Si durante la primera mitad del siglo XVI España había sido pionera e iba por delante en muchos saberes científicos (náutica, ingeniería militar...), ¿cómo entró en decadencia hasta impedir que se transmitiese el nuevo conocimiento científico durante el periodo más creativo del resto de Europa, y cómo pudo volver a situarse en un ambiente de enseñanza normalizada de la ciencia? ¿Por qué no florecieron en la monarquía de los Austrias figuras equivalentes a los Galileo, Pascal, Descartes, Huygens, Leibniz, Newton... y, sin embargo, lo hicieron en novela, teatro o arte (Cervantes, Calderón, Velázquez...)? ¿Y cómo a finales del siglo XIX y principios del XX vol-

cación en otros campos como la economía en relación con la demanda de un producto. En la medida en que aumenta cada vez más el número de científicos que apoyan la nueva teoría, se produce un efecto de «adhesión al ganador» que induce una tendencia en el resto a no quedar autoexcluido, a no ir contracorriente y ser señalado negativamente. Para que actúe el *efecto bandwagon* es necesario que exista un número suficiente de científicos que apoyan la nueva teoría, lo que en IN EXTENSIS sucede cuando aparece el agregado de percolación. En la mayoría de estudios sociales y económicos en los que adquiere relevancia el *efecto bandwagon*, éste es tratado como un factor externo al sistema. En nuestro caso no sucede lo mismo. El *efecto bandwagon* debe ser incluido en el grupo de factores co-determinantes y, como a cualquiera de ellos, no se le puede otorgar la categoría de una externalidad de red. El mismo tratamiento se les debe conceder al efecto opuesto al *bandwagon* —el *efecto underdog* o de «adhesión al perdedor»— y al *efecto sibarita*, que contribuyen a explicar la fidelidad inquebrantable que han mostrado y muestran algunos científicos a la antigua teoría, aunque la nueva haya sido aceptada con normalidad por la comunidad científica.

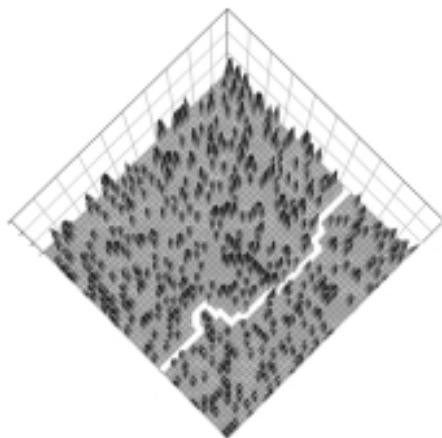


PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

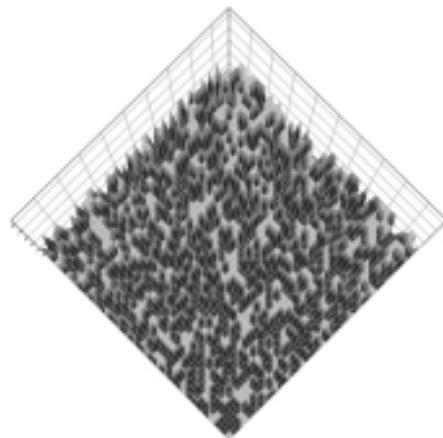
vieron a resurgir figuras e instituciones científicas homologables a cualesquiera otras (Ramón y Cajal, la Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas...)?

IN EXTENSIS EN TRES DIMENSIONES

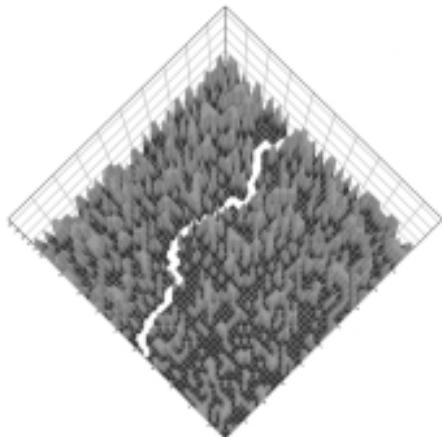
Etapa A



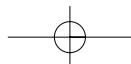
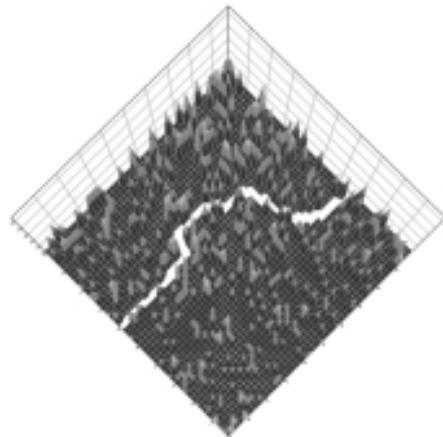
Etapa B

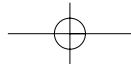


Etapa C



Etapa D





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

Para hacer más intuitivo el modelo propuesto, simplificaremos las corrientes enfrentadas en España entre «aristotélicos» y «no aristotélicos». Durante la primera mitad del siglo XVI, la ciencia que se hace en España es homologable a la que se realiza en el resto de Europa y está abierta a todos los campos de desarrollo técnico y científico conocido, desde la astronomía a la ingeniería urbana; mas a partir del Concilio de Trento (1545-1563) y la prohibición de Felipe II de que los españoles estudien y enseñen en universidades extranjeras (1558), los «aristotélicos» dominan el panorama científico español, tanto en la enseñanza controlada por los jesuitas como en las universidades. Así, la *Ratio Studiorum* jesuítica es aristotélica, defensora del ecléctico sistema cosmológico de Tycho Brahe; en la monumental *Ars Logica* de Juan de Santo Tomás, culminación del aristotelismo medieval, no aparece ni Copérnico ni Galileo... La teoría T («aristotélica»), aunque dominante, convive aún con saberes científicos y técnicos «no aristotélicos». Pero en los cuarenta años centrales del siglo —según la clasificación de López Piñero—, T domina ya todo el panorama científico hispano. El cierre puede fecharse simbólicamente en 1616, cuando la Sagrada Congregación del Índice declara falsa la teoría heliocéntrica. Este periodo corresponde a la etapa A del modelo.

Pero ya en el reinado de Carlos II (1665-1700) comienzan a abrirse corrientes a favor de las ciencias «no aristotélicas». Los llamados «novatores» empiezan a hacerse presentes desde las exigencias de la industria y el comercio, que se han de plegar al mercado mundial impuesto por los anglosajones: Juan Pablo Díez en Zaragoza, Narcís Feliu de la Penya en Barcelona o el propio ministro Oropesa en Madrid. A estos movimientos se une la propia investigación científica auspiciada por los mecenas Juan José de Austria, hijo ilegítimo de Felipe IV; el marqués de Villena, el marqués de Mondéjar... y las «tertulias» de científicos, entre las que destaca la reunida en torno al matemático Baltasar de Íñigo en Valencia, a la que asisten Tomás Vicente Tosca y J. Bautista Carachán... o catedráticos como Crisóstomo Martínez, de la Facultad de Medicina de Zaragoza... Es la situación que recoge la etapa B del modelo, caracterizada por un empate técnico entre ambas concepciones rivales ($p = q = 0,5$).

Con la llegada de los Borbones, y la renovación del imperio, se hace necesario poner la ciencia y la técnica al día, siendo uno de sus promotores más entusiastas el marqués de Ensenada. El momento culminante de ruptura entre «aristotélicos» y «no aristotélicos» puede situarse a partir del trabajo de Jorge Juan *Observaciones astronómicas y físicas* (1748), en el que se incorpora de forma normalizada y actualizada la matemática y la física de Newton. Jorge Juan ha verificado la potencia de la física de Newton en la expedición al Perú para medir la longitud del meridiano terrestre. El punto crítico del sistema ($p = p_c$) tiene lugar en esta etapa C y puede situarse en el momento en que la obra de Jorge Juan es asumida por la Academia de Guardia Marinas de Cádiz, de la

PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

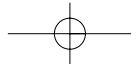
que fue director desde 1752 a 1766. A partir de este momento el proceso de expansión de T' se hace irreversible.

De esta forma, la teoría T' entra en un camino ascendente y sin retorno, inicialmente muy cercano al punto crítico entre «aristotélicos» y «no aristotélicos», hasta que las sucesivas reformas de los liberales en el siglo xix culminan con la creación de las Escuelas Técnicas: desde 1834 con el Plan del duque de Rivas, ministro de la Gobernación, en el que se regula la incorporación de los maestros por «oposición», pasando por la Ley Someruelos de Enseñanza Primaria en 1838, que establece la financiación de las escuelas públicas y ordena la creación de una Escuela Normal Central en Madrid; el *Plan Pidal* de 1845, que incorpora la secularización, gratuidad, centralización y uniformización de la enseñanza; la Ley Moyano de 1857, que crea la Facultad de Ciencias... Y así se llega a 1833, año en el que se inaugura la Escuela Técnica de Ingenieros de Minas y Caminos, y se continúa con la fundación de las Escuelas de Montes (1846), Industriales (1850) y Agrónomos (1855). Es la etapa D del modelo.

4. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO FRACTAL

El modelo matemático propuesto tiene capacidad explicativa, es decir, es capaz de dar razón al fenómeno de propagación del conocimiento —en principio, un fenómeno enigmático o no determinista—, que ahora queda comprendido al ser incorporado al sistema. Aunque, en cualquier caso, la explicación queda limitada por las características internas del modelo:

1) *Carácter holístico del sistema:* En contraste con el estándar reduccionista que intenta descomponer el sistema en elementos aislados, efectuar su estudio por separado y volver a ensamblar las partes para obtener el sistema entero e intentar así extraer conclusiones, IN EXTENSIS opera de manera holística, por lo que es posible obtener información sobre la evolución del sistema sin necesidad de poseer un conocimiento detallado del comportamiento de los agentes individuales que lo conforman. La ausencia de predicciones puntuales no significa que el sistema tenga un comportamiento aleatorio en el que, por ejemplo, los científicos individuales tomen sus decisiones como resultado del puro azar, sino que el sistema evoluciona conducido por los *factores co-determinantes*. En el ejemplo presentado, el modelo no puede valorar por separado los factores que hacen las interpretaciones clásicas sobre la decadencia de la ciencia: ya sea que pongan la causa en la educación jesuítica (por defender el dogma de la transustanciación, si hacemos caso a Redondi), en la persecución inquisitorial, en la raza mediterránea, etc. O, simétricamente, en la influencia



LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

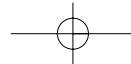
aislada que pudieran tener en la recuperación de la ciencia los novatores, los liberales, los krausistas, etc.

2) *Sistema no controlable*: IN EXTENSIS es de naturaleza ubicua y presenta una impredecibilidad intrínseca en el comportamiento de los agentes individuales. Y es precisamente esta característica la que le hace ser difícilmente controlable. El intento de influir en una determinada dirección en la evolución del sistema, incidiendo *únicamente* en uno de los factores co-determinantes, puede no resultar acertado, ya que esta medida aislada puede no afectar al valor de p . Es más, como los factores co-determinantes están íntimamente relacionados entre sí de manera no lineal, cualquier alteración en alguno de ellos tendría un efecto no predecible sobre el resto del conjunto y podría llegar incluso a causar un efecto contrario al pretendido⁶. Por ejemplo, no parece lo más adecuado atribuir a los jesuitas toda la responsabilidad del retraso científico experimentado en la época; pero tampoco cabe exonerarlos de cualquier responsabilidad. Coincidiríamos con el ponderado juicio de Menéndez Pelayo cuando afirma que «es cierto que los jesuitas no fueron autores ni fautores de nuestra decadencia científica aunque participasen en ella como todo el mundo» (1989: XLVI).

3) *Momentos singulares en la evolución del sistema*: El sistema muestra en su evolución momentos de ruptura o de saltos cualitativos. En él, P puede tomar sólo dos valores: 1 ó 0. $P = 1$ significa que la comunidad científica acepta como propia y válida una teoría; $P = 0$, que no la acepta. Y ocurrirá una cosa u otra en función de que p sobrepase o no alcance el valor de la probabilidad umbral p_c .

IN EXTENSIS impide que el sistema llegue a adoptar su estado ordenado de forma gradual y desecha, en consecuencia, el concepto de progreso científico acumulativo. De existir éste, la gráfica para representar los procesos de cambio científico sería similar a la que aparece en el GRÁFICO-1, que sirve de modelo del cambio científico acumulativo. Sin embargo, en nuestro modelo —ver GRÁFICO-2— no aparecen cambios acumulativos; al contrario, se aprecia la existencia de un momento «singular» en su evolución.

⁶ Esta característica aparece presente en otros trabajos que utilizan la percolación y los sistemas complejos para estudiar diversos fenómenos sociales. Es el caso, por ejemplo, de los estudios realizados sobre percolación y terrorismo, dedicados a explicar el comportamiento del movimiento terrorista a escala global. En estos estudios se realiza, en sintonía con el modelo matemático, una serie de propuestas para minimizar sus efectos y contribuir a su no propagación en la sociedad. Debido al carácter holístico del sistema que estudian y a su naturaleza ubicua, los investigadores proponen que las acciones encaminadas a mitigar los efectos del terrorismo no pueden ser aisladas ni unidireccionales [Collette and Siarry, 2003], ya que la adopción de una medida aislada —por ejemplo, basada únicamente en la seguridad— podría no influir sobre el valor de p . Puede ocurrir incluso que adoptar este tipo de medidas unidireccionales que resultan «aparentemente sabias» —como el uso de una fuerza excesiva— puede contribuir a agravar el problema [Ahmed E., Elgazzar A. S. and Hegazi A. S., 2005] y nutrir las filas de terroristas activos. Por ello se proponen medidas multi-objetivo: sociales, políticas, económicas, de seguridad... Lo que está en consonancia y en relación directa con el concepto de factores co-determinantes: ninguno de ellos resulta por sí solo concluyente ni decisivo a la hora de que un científico efectúe su elección.



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

GRÁFICO 1

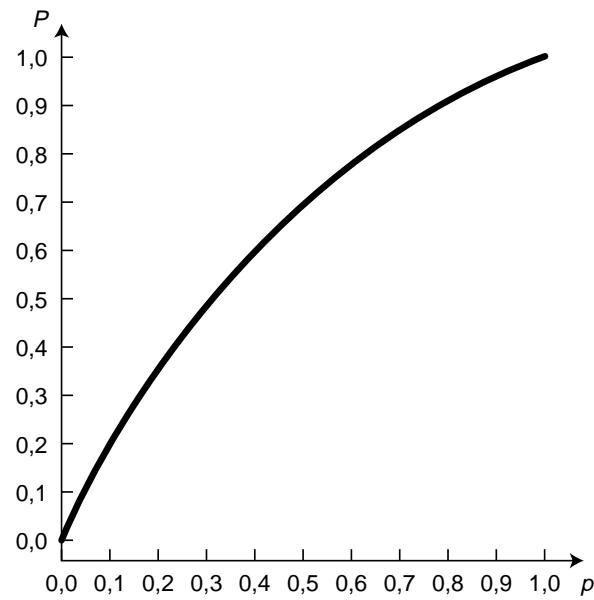
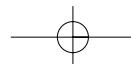
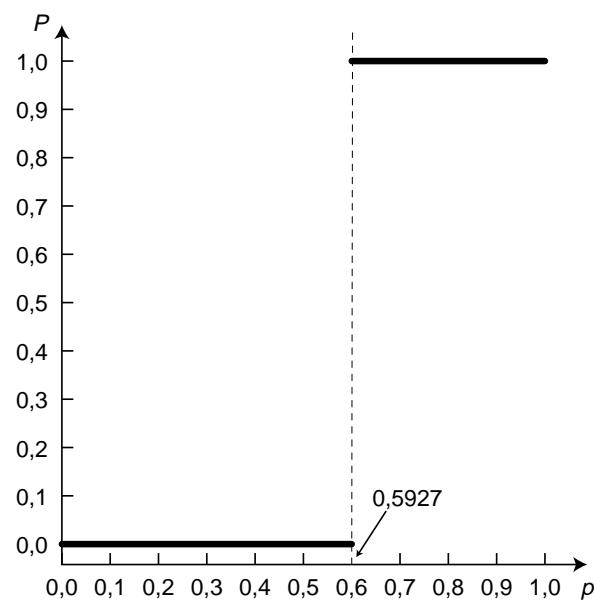
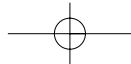


GRÁFICO 2





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

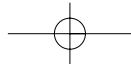
IN EXTENSIS permite interpretar a Thomas S. Kuhn desde la perspectiva de los Sistemas Dinámicos Complejos, por lo que se abre un nuevo marco de referencia para valorar su obra *La estructura de las revoluciones científicas*. Esta interpretación puede realizarse incluso desde la terminología específica utilizada en el estudio de los sistemas no deterministas. El siguiente pensamiento de Kuhn, relativo a la transición entre paradigmas contemporáneos, puede interpretarse en relación con la aparición de una ruptura y singularidad en la evolución del sistema:

Como el cambio de forma (Gestalt), debe tener lugar de una sola vez (aunque no necesariamente en un instante) o no ocurrir en absoluto (Kuhn, 1975: 234).

La afirmación «*de una sola vez*» coincide con el momento en que la probabilidad p alcanza el valor crítico de la probabilidad umbral p_c ; «*aunque no necesariamente en un instante*» alude al hecho de que la sustitución de teorías es un *proceso*—no un suceso—que puede prolongarse un considerable periodo de tiempo durante el cual p aumenta progresivamente su valor. Y resulta significativo que Kuhn alude a este suceso umbral afirmando que debe ocurrir así «*o no ocurrir en absoluto*», haciendo con ello una clara referencia a la ley del «*todo o nada*» que caracteriza la función obtenida en IN EXTENSIS, así como a un importante número de Sistemas Dinámicos Complejos.

La implantación de la ciencia newtoniana en la Academia de Guardia Marinas de Cádiz constituye el punto crítico, el momento «singular» en el proceso de propagación de la nueva ciencia a partir de la publicación de *Observaciones astronómicas y físicas* (1748), que se utilizó como manual. Escrito por Jorge Juan y Antonio de Ulloa, que se habían familiarizado con el cálculo en la expedición organizada por la *Académie des Sciences* de París, dirigida por La Condomine, para medir el grado de longitud de la esfera terrestre; en ella, nuestros guardiamarinas se «convirtieron» a la teoría de Newton por ser la teoría que mejor se avenía con las medidas que realizaron.

4) *Autoorganización*: El ordenamiento súbito y espontáneo de las elecciones individuales y autónomas llevadas a cabo por cada científico individual responde a un proceso de autoorganización social. Esta autoorganización del sistema se produce en IN EXTENSIS al sobrepasar p el valor de la probabilidad umbral p_c , y se abre paso sin imponer ninguna restricción previa —ni en las condiciones iniciales del sistema ni en su evolución— que lo conduzca de manera forzosa y obligada a alcanzar un estado ordenado. El orden aparece, pues, «espontáneamente» y responde a un proceso interno que ocurre en el sistema y que resulta opaco a los ojos de los sujetos —los científicos individuales— que lo producen. La autoorganización es una característica propia de muchos Sistemas Dinámicos Complejos, tanto vivos como inertes. En este sentido, comparte características comunes con los



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

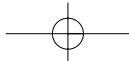
sistemas *disipativos* estudiados por *Ilya Prigogine*. Estos sistemas, al estar alimentados por una fuente energética, intercambian energía con el medio que les rodea y dependen de ella para mantener su autoorganización.

Como afirma *Ilya Prigogine*, la autoorganización es el «resultado de un *cálculo* en una naturaleza en la que los procesos macroscópicos estables son engendrados por una multitud de procesos desordenados y, en determinadas condiciones, a merced de las fluctuaciones de las cuales son producto» (Prigogine y Stengers, 1977: 273). Una vez que la ciencia newtoniana se asume en la Academia de Guardia Marinas de Cádiz, el sistema se autoorganiza, se reordena y T' se propaga por centros e instituciones oficiales. La misma Escuela de Guardia Marinas de Cádiz se convierte en centro de estudios para entrenar a oficiales en empresas hidrográficas o se publica un Almanaque Náutico hasta que el Observatorio se separa de la Escuela; se escriben tratados de navegación en clave newtoniana, como el de José de Mendoza y Ríos; así como el texto de Pedro Padilla en la Academia de Barcelona, *Cálculo Diferencial e Integral o método de las fluxiones* (1753), etc.

5) *Racionalidad emergente*: Desde un enfoque determinista/reduccionista, el sistema debería haber alcanzado el orden como consecuencia de la actuación de leyes independientes del observador que, una vez conocidas con la suficiente aproximación, dirigen su dinámica y acaban conduciendo al sistema hacia el orden. En este caso, tiene sentido emplear el término *racionalidad científica* y calificar esta *racionalidad* como objetiva y neutral. Ahora bien, como nuestro modelo no participa de este enfoque y la comunidad científica no se concibe sólo en términos que sean aplicables a los científicos individuales, es posible realizar una interpretación alternativa: la *racionalidad* que se desprende del modelo IN EXTENSIS no es el resultado de la aplicación de reglas metodológicas preestablecidas y delimitadas con precisión, ni precisa de procedimientos algorítmicos neutrales que conduzcan a los científicos individuales a efectuar la misma elección, si proceden *racionalmente*. Esta *racionalidad* es el resultado de la autoorganización del sistema y resulta ser una *propiedad emergente*: una característica del sistema que no existe en el nivel individual de sus partes aisladas. De ahí que la denominemos *racionalidad emergente*. Según IN EXTENSIS, el triunfo definitivo de los «no aristotélicos» y la adopción de la nueva ciencia no es el resultado de la suma de las decisiones de los científicos individuales que la generan, sino que emerge en la mitad del siglo XVIII como una nueva característica en el conjunto de la comunidad científica española de la época y se extiende por todos los campos de la ciencia: tratados de navegación, hidrografía, cartografía de las costas peninsulares, etc.

Para fijar el concepto de *racionalidad emergente* y delimitar su campo de aplicación es necesario, una vez más, distinguir entre la aceptación de una teoría por parte de cada científico individual y por la comunidad científica, distinción matemáticamente representada por





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

los valores de p y P . ¿A quién puede aplicarse el concepto de racionalidad emergente? IN EXTENSIS nos dice que el sujeto de esa racionalidad es la comunidad científica —no los científicos individuales— y que cristaliza cuando las casillas «gris oscuro» percolan la malla.

6) *Concepto de ciencia*: IN EXTENSIS empieza con un desacuerdo y termina con un nuevo acuerdo cuando el sistema se reordena al hacer acto de presencia el agregado de percolación. IN EXTENSIS propone, pues, un modelo consensual para los procesos de cambio científico y considera la ciencia como una actividad intrínsecamente comunitaria en donde el responsable último no es el científico individual, sino la comunidad científica. Como afirma Kuhn:

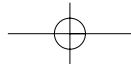
No hay ninguna norma más elevada que la aceptación de la comunidad científica
(Kuhn, 1975: 152).

Lo que permite demarcar el concepto de ciencia que se practica en una determinada etapa: ciencia es el conjunto de acuerdos compartidos por una comunidad de expertos. Por eso no puede haber ciencia fuera de las instituciones científicas. El caso de Santiago Ramón y Cajal, por ejemplo, no es el de un científico autónomo, sino que está incorporado a las instituciones que desplegaron la ciencia en la España posterior al Sexenio Democrático (1868-1874).

5. IN EXTENSIS Y EL CONSTRUCTIVISMO SOCIAL DE KUHN

Las características a las que nos ha conducido el modelo fractal nos han permitido formular algunas conclusiones relevantes en lo concerniente al estudio de los fenómenos de propagación. Al mismo tiempo, nos invitan a hacer algunas reflexiones sobre la sociología cuando se interesa por la propagación de los conocimientos científicos, lo que puede ser utilizado como alternativa a otros modelos propuestos en el ámbito sociológico.

1) *Los factores co-determinantes no quedan especificados*. El concepto de factores co-determinantes es una muestra de que IN EXTENSIS es un *sistema no determinista*: la formación de cada uno de los subgrafos —que representan a cada una de las partes en litigio— ni está determinada de antemano ni es única, y tampoco están determinados los sucesivos futuros puntuales que alcanza el sistema en su evolución; sin embargo, esta indeterminación del sistema no lo conduce al desorden ni le otorga propiedades misteriosas o de «explicación de caja negra», ya que la manifestación de sus propiedades no depende de los detalles de la estructura del fractal. El concepto de «factores co-determinantes» se introduce como una consecuencia inmediata de la construcción del sistema y aparece en



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

él de manera obligada al asignar las probabilidades «p» y «q» a las decisiones efectuadas por cada científico individual.

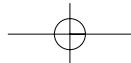
La construcción y evolución del sistema no permiten, pues, caracterizar cada uno de estos factores y, menos aún, cuantificar el grado de influencia que cada uno de ellos ejerce sobre un científico. Puede ocurrir que un mismo factor lleve a científicos distintos a realizar elecciones distintas y que distintos factores conduzcan a un grupo de científicos a inclinarse por la misma opción. Es más, la decisión final puede ser el resultado de la influencia no sólo de uno, sino de varios de estos factores. Esta importante característica del modelo justifica la afirmación de Kuhn:

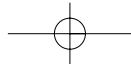
los científicos individuales aceptan el nuevo paradigma por toda clase de razones, y habitualmente por varias al mismo tiempo (Kuhn, 1975: 237).

Por el método empleado en el estudio, cualquier propiedad o característica que no esté vedada al sistema puede ocurrir y, de hecho, ocurre. En consecuencia, al no dar el sistema cuenta detallada de cuáles son estos factores, se pueden incluir en él los considerados propios de la práctica científica —la concordancia del modelo teórico con los resultados experimentales obtenidos, su capacidad para hacer predicciones...—, como también factores subjetivos o psico-sociológicos —creencias religiosas, gustos estéticos, ideologías, preferencias personales...—. Por ello, IN EXTENSIS puede asumir también a Kuhn cuando afirma:

El hombre que adopta un nuevo paradigma en una de sus primeras etapas, con frecuencia deberá hacerlo a pesar de las pruebas proporcionadas por la resolución de problemas. O sea, deberá tener fe en que el nuevo paradigma tendrá éxito al enfrentarse a los muchos problemas que se presenten en su camino, sabiendo que sólo el paradigma antiguo ha fallado en algunos casos. Una decisión de esta índole sólo puede tomarse con base en la fe (Kuhn, 1975: 242).

Por lo tanto, en la evolución del sistema también tiene cabida un amplio y variado conjunto de factores —a los que en ocasiones se les denomina *factores ajenos al ámbito científico*— que pueden ejercer influencia y tener un peso específico propio en la toma de decisiones de los científicos individuales. Esta característica nos lleva a plantearnos si la denominación de «factores ajenos al ámbito científico» resulta del todo apropiada y no deberían ser más bien considerados como factores endógenos a la práctica científica, tal como sugiere IN EXTENSIS. En este caso, resultaría en extremo difícil, por no decir imposible, distinguir los elementos singulares que caracterizan a toda investigación científica de aquellos que hacen acto de presencia en otros dominios (sociológico, familiar, política, negocios...).





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

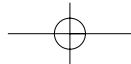
Si las razones que guían a cada científico individual a hacer su elección están motivadas por un conjunto tan diverso y variopinto de factores, incluyendo entre ellos algunos que no son propios ni exclusivos de la práctica científica y que en ocasiones resulta imposible armonizar y congraciarse entre sí, es consecuente con el modelo sostener que las partes en litigio se encuentran *hasta cierto punto obligadas a hablar sin entenderse* (Kuhn, 1975: 230) y que *quienes proponen los paradigmas en competencia practican sus profesiones en mundos diferentes* (Kuhn, 1975: 233).

De todo ello se obtiene como corolario *la omisión en el modelo de conceptos epistemológicos y metodológicos como «verdad», «objetividad»...* La no predictibilidad de los sucesivos futuros puntuales en cada etapa del sistema trae como consecuencia que la «imagen» que cada científico se forma del sistema estudiado sea potencialmente distinta en cada uno de ellos. Lo que viene a significar que el conjunto de los factores co-determinantes, más que a un camino preconcebido con antelación y delimitado con exactitud en su trazado, se asemeja más a un amplio camino, de márgenes no siempre precisos ni claramente identificados y que se conforma a medida en que va siendo utilizado. De ahí que, al tomar los científicos individuales sus decisiones, conceptos tales como *verdad científica, objetividad* e incluso otros como *método científico* no hagan acto de presencia en la evolución del sistema, ni desempeñen en él un papel relevante, desde el momento en que el sistema alcanza un estado ordenado sin necesidad de recurrir a ninguno de ellos.

2) El *constructivismo social* de Kuhn. IN EXTENSIS permite justificar la interpretación que hace el constructivismo de los procesos de cambio científico. En concordancia con el constructivismo, nuestro modelo omite el conocimiento por representación —la verdad como correspondencia entre una «imagen» y lo real— o por desvelamiento —eliminación de lo que oculta o recubre la verdad— y afirma que lo que pensamos, defendemos y comunicamos se configura como «constructos» de una actividad humana en una comunidad social de saberes. Desde un enfoque constructivista social, la realidad, incluida la práctica científica, está constituida por las creencias de una sociedad dada. Al constructivismo no le preocupa sólo la verdad científica en su estructura interna, y su interés por la ciencia es epistemológicamente equivalente al que muestra por cualquier otro fenómeno social: artístico, religioso, político...

Así, aunque Kuhn proteste contra la imputación de ser uno de los padres —junto a Wittgenstein— del constructivismo social y nunca haya apartado su mirada de la evidencia experimental y las reglas metodológicas, la lectura constructivista está implícita en el núcleo de su pensamiento, tal como hemos querido mostrar con el modelo fractal propuesto.

Pero incluso nos atreveríamos a ir más lejos: a veces se diría que Kuhn se ejercita en modelar los fenómenos de acuerdo con el nuevo espíritu que han introducido estas hera-



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

mientas matemáticas y muestra en el terreno de la sociología de la ciencia, y en paralelo con el modelo matemático, la paradoja de ese nuevo *paradigma* —por hacer honor al concepto estrella de su obra— en matemáticas: un enfoque global que ignora las particularidades y que sin embargo posee, paradójicamente, la capacidad de revelar rasgos específicos del sistema que un examen demasiado minucioso y atento a los detalles no es capaz de poner de manifiesto.

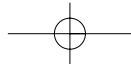
6. CONCLUSIÓN

Si se coloca en un polo a quienes defienden que la ciencia es una aproximación a la verdad y supone una descripción ajustada del mundo real, y en el otro polo a quienes defienden que todo conocimiento sobre la naturaleza y el mundo es construido socialmente, la forma de entender la relación e interconexión entre los polos es la que marca las diferencias existentes entre las distintas interpretaciones. Al cargar todo el peso sobre uno de los polos se abre paso al *realismo objetivista*; al hacerlo sobre el otro, al *construccionismo extremo*. Si, por el contrario, se otorga un peso ponderado a cada uno de los polos, se obtiene un punto intermedio del segmento que los une y se abre un amplio abanico de opciones.

¿Qué interés puede ofrecer este modelo fractal IN EXTENSIS a los sociólogos de la ciencia? IN EXTENSIS no se encuentra en ningún punto intermedio de ese segmento y, a *for* *tiori*, en ninguno de sus extremos, pues no valora la influencia que ejerce cada factor realista o construccionista en la tarea de establecer un criterio de validación de teorías en competencia. IN EXTENSIS se acerca al estudio de la naturaleza de la ciencia por otro camino, describiendo una nueva trayectoria, ajena al segmento, a partir de sus determinaciones:

- No puede decidirse *a priori* la influencia de los factores co-determinantes.
- El conjunto de estos factores conduce al científico a efectuar su decisión de manera individual.
- Una teoría queda validada en el seno de la comunidad científica al actuar la racionalidad emergente y aparecer el agregado de percolación como resultado de la autoorganización del sistema.
- Esta racionalidad es una propiedad emergente del sistema y actúa sobre el conjunto de la comunidad científica.





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

- El cambio y sustitución de teorías que marca el progreso científico no responde a un proceso acumulativo, sino que representa un momento «singular» en la evolución del sistema.

En cada punto de esa trayectoria no se conoce cuánto hay de ciencia y cuánto hay de sociedad. Lo cual, como explica IN EXTENSIS, no es óbice para que se genere un camino ordenado y transitable.

GLOSARIO

PERCOLACIÓN: El concepto de percolación —del latín *percolare*: colar, filtrar—, introducido por *J. M. Hammersley* y *S. R. Broadbent* en 1957, alude al flujo de un líquido a través de un medio poroso. Consideremos una malla en donde cada uno de sus nodos puede ser *abierto* (deja pasar el fluido) o *cerrado* (impide el paso del fluido), de acuerdo con el valor de una probabilidad dada p . Una vez conocida la distribución de los nodos y la manera en que se enlazan o comunican entre ellos (el recorrido posible que puede seguir el fluido para pasar de un nodo a otro), nos centramos en el estudio de las condiciones que hacen posible que el fluido se extienda y recorra de una parte a otra la malla.

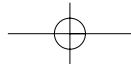
Como característica general, puede decirse que la percolación sirve de modelo para estudiar las conexiones entre grupos de elementos en sistemas desordenados y heterogéneos, en donde el tema clave es la propagación: de una epidemia en una población, de un fuego a través del bosque, del movimiento terrorista en la sociedad global en que vivimos, de la corriente eléctrica en un sistema aislador-conductor, de una plaga de insectos en un campo de frutales..., o la propagación del conocimiento científico en nuestra sociedad. La percolación encuentra aplicaciones en disciplinas como la física, química, ciencia de los materiales, metalurgia, sociología...

AGREGADO O CLUSTER: Conjunto de nodos que se encuentran todos ellos enlazados entre sí por la relación de vecindad definida.

AGREGADO INFINITO DE PERCOLACIÓN: Es el agregado que atraviesa de parte a parte la malla.

CAMINO: Cualquier subconjunto de nodos, elegidos entre los que forman el agregado de percolación, que cruza la malla.

FRACTAL: El término fractal —del latín *fractus*: roto, interrumpido— fue introducido por Benoît Mandelbrot en 1975. Un fractal es un objeto matemático de formas indefinidamente



PEDRO ANTONIO POMATA, FERNANDO MIGUEL PÉREZ, JOSÉ IGNACIO ÚBEDA Y JOSÉ MANUEL IÑESTA

fragmentadas que sirve de herramienta matemática para el estudio de fenómenos naturales muy diversos y, en ocasiones, impredecibles. Una de las características principales de cualquier objeto fractal es su *dimensión fractal* (D), que mide su grado de irregularidad e interrupción, y resulta ser normalmente no entera.

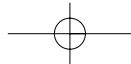
Para caracterizar un fractal nos remitimos a la propuesta realizada por Kenneth Falconer: un conjunto F tiene estructura fractal cuando satisface al menos alguna de las propiedades siguientes:

- 1) F posee detalle en todas las escalas de observación.
- 2) No es posible describir F mediante la Geometría Euclídea, tanto local como globalmente.
- 3) F posee alguna clase de autosemejanza, posiblemente estadística.
- 4) La dimensión fractal de F es mayor que su dimensión topológica.
- 5) El algoritmo utilizado para describir F es simple y, posiblemente, de carácter recursivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENJO BULLÓN, X. (2002): «La Hipótesis de Ortega», *Revista de Estudios Orteguianos*, Madrid, pp. 103-110.
- BROADBENT, S. R., y HAMMERSLEY, J. M. (1957): «Percolation processes. I. Crystals and mazes», *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 53, pp. 629-641.
- COLE, R., y COLE, S. (1972): «The Ortega Hypothesis: Citation analysis suggest that only a few scientists contribute to scientific progress», *Science*, 178, pp. 368-375.
- DIESTEL, R. (2000): *Graph Theory*, Springer Verlag.
- FALCONER, K. J. (1990): *Fractal Geometry*, John Wiley & Sons, New York.
- GALAM, S. (2003): «Global Physics. From percolation to terrorism», *Physica A*, 330, 139.
- GUPTA, A. K., y STAUFFER, D. (2000): «Social Percolation on Inhomogeneous Spanning Network», *International Journal of Modern Physics C*, Volume 11, Issue 04, pp. 695-706.
- GUZMÁN, M.; MARTÍN, M. A.; MORÁN, M., y REYES, M. (1993): *Estructuras fractales y sus aplicaciones*, Labor, Barcelona, pp. 72-77.
- HAMMERSLEY, J. M. (1957): «Percolation processes. II. The connective constant», *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 53, pp. 642-645.





LA PROPAGACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: UN MODELO FRACTAL

KUHN, T. S. (1962): *The Structure of Scientific Revolution*, University of Chicago Press. Ed. cast.: *La estructura de las revoluciones científicas*, FCE, México, 1975.

LÓPEZ PIÑERO, J. M. (1979): *Ciencia y Técnica en la sociedad española de los siglos xvi y xvii*, Labor, Barcelona.

MAKSE, H. A.; HAVLIN, S., y STANLEY, H. E. (1995): «Modelling Urban Growth Patterns», *Nature*, 377, pp. 608-612.

MANDELBROT, B. (1975): *Les objets fractals. Forme, hasard et dimension*, Flammarion, París. Ed. cast.: *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*, Tusquets, Barcelona, 1987.

MENÉNDEZ PELAYO, M. (1989): «Prólogo» a Fernández Vallín, *Cultura científica en España en el siglo xvi*, Padilla Libros, Sevilla.

PRIGOGINE, I., y STENGERS, I. (1997): *La nueva alianza*, Biblioteca Universal, Barcelona.

SIMKIN, M. V., y ROYCHOWDHURY, V. P. (2005): «Copied citations create renowned papers?», *Annals of Improbable Research*, 11, n.º 1, p. 24.

SOLOMON, S.; WEISBUCH, G.; DE ARCANGELIS, L.; JAN, N., y STAUFFER D. (2000): «Social Percolation Models», *Physica A*, 277, 239.