

PATRONES Y ESTRUCTURAS DISIPATIVAS EN CUEVAS Y GEOFORMAS DEL PSEUDOKARST DE JAIZKIBEL

Patterns and dissipative structures in caves and geoforms of the Jaizkibel pseudokarst



Carlos Galán Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.
E-mail: cegalham@yahoo.es Abril 2010.

PATRONES Y ESTRUCTURAS DISIPATIVAS EN CUEVAS Y GEOFORMAS DEL PSEUDOKARST DE JAIZKIBEL

Patterns and dissipative structures in caves and geoforms of the Jaizkibel pseudokarst

Carlos Galán

Laboratorio de Bioespeleología - Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: cegalham@yahoo.es

Abril 2010.

RESUMEN

Se presenta una visión de los procesos que intervienen en la formación de cuevas y geoformas en el pseudokarst de Jaizkibel. Muchas geoformas traducen procesos de autoorganización y formación de patrones, impulsados por mecanismos de disipación de energía y reactividad química de las soluciones en el interior del acuífero, propios de sistemas complejos. Estos son poco conocidos en estudios del karst. Con la finalidad de hacerlos más comprensibles aportamos una revisión de la trama de conceptos, hipótesis y modelos utilizados en sistemas complejos, y su aplicación a los patrones de geoformas. Se discuten los conceptos utilizados y la trama de resultados.

Palabras clave: Espeleología física, geología, pseudokarst, arenisca, cuevas, sistemas complejos, disipación de energía, geoformas.

ABSTRACT

We present a vision about the processes that take part in the formation of caves and geoforms in the Jaizkibel pseudokarst. Many geoforms express processes of autoorganization and pattern formation, fuelled by chemical energy dissipation and chemical reactivity of the solutions into the aquifer, typical of complex systems. These are little known in karst studies. In order to make them more understandable we furnish a revision of framework of concepts, hypothesis and models used in complex systems, and its application to patterns of geoforms. We discuss the concepts used and the results framework.

Key words: Physical Speleology, Geology, pseudokarst, caves, sandstone, complex systems, energy dissipation, geoforms.

INTRODUCCION

En las cuevas y geoformas del pseudokarst de Jaizkibel (Gipuzkoa, País Vasco) encontramos patrones de estructuras disipativas y formas inusuales en hidrogeología del karst, propios de sistemas abiertos y sistemas complejos. Estos son poco conocidos en estudios del karst. Hemos recibido la sugerencia de aportar una visión más extensa de la trama de modelos, hipótesis y conceptos, crecientemente utilizada en estudios de tales sistemas, en diversos campos, y con tal finalidad hemos preparado esta nota, que incluye dos partes. En la primera se presenta una recopilación general de los conceptos y modelos más utilizados en la teoría general de sistemas y en la segunda se aborda su aplicación a los patrones de geoformas del pseudokarst.

La percepción de sistemas abiertos en el mundo real fue introducida tempranamente en biología. Particularmente en ecología, el concepto de flujos de materia y energía a través de los ecosistemas, resultó de la extensión, a nivel más complejo, de cualidades presentes en las vías metabólicas de los organismos. La evolución y el cambio son caracteres fácilmente visualizables en los seres vivos, al igual que los procesos de autoorganización y la tendencia de la materia a organizarse en niveles de creciente complejidad.

Sin embargo, las concepciones cartesianas del mundo como una máquina predominaron ampliamente en física y geología. El pensamiento analítico excluyó en gran parte la cualidad de la ciencia, restringiendo ésta a la descripción y estudio de fenómenos que pudiesen ser medidos y cuantificados. Esta distorsión entre cantidad y cualidad impregnó y aún impregna una buena parte del pensamiento científico. Habrá que esperar al desarrollo de la física cuántica, la cibernética y la tectónica de placas, para que las visiones sistémicas vuelvan a predominar.

La tensión entre mecanicismo y pensamiento sistémico ha sido un tema recurrente a lo largo de la historia de la ciencia y es una consecuencia de la falsa dicotomía entre sustancia (materia, estructura, cantidad) y forma (patrón, orden, cualidad). La evolución, como muchos otros fenómenos reales, no puede ser comprendida cabalmente con un enfoque mecanicista y es necesario recurrir al pensamiento sistémico para lograr una mejor aproximación.

Aunque no tratamos con seres vivos, en este trabajo estudiamos estructuras y fenómenos propios de una fase prebiológica de evolución, en sistemas químicos situados en la frontera entre el mundo morfológico de la simetría orgánica y el de la simetría cristalina inorgánica. Se trata de soluciones que contienen carbonatos, sílice, oxi-hidróxidos de hierro y aluminio, y otros elementos (sulfatos, silicatos, etc.) en pequeñas cantidades, y cuya reactividad química ha generado patrones ordenados.

En el karst en caliza habitualmente sólo tratamos con soluciones de carbonatos. En el karst en cuarcita (arenitas de cemento silíceo) con soluciones silíceas. En la arenisca de Jaizkibel (de cemento carbonático) el sistema es multicomponente en su química y mineralogía. Los procesos de disolución (y precipitación) en el interior del acuífero adquieren por tanto mayor complejidad, la cual, a través de varios procesos, puede generar patrones de celdas poligonales, alveolos, bandas de coloración, y una gran diversidad de geoformas, desconocidas para el karst clásico y para el karst en cuarcita.

Debido a la especialización hoy predominante en las distintas ramas científicas, los investigadores en espeleología física, hidrogeología y karstología, a menudo trabajan con conceptos restringidos, propios de disciplinas separadas. El pensamiento sistémico,

por el contrario, necesita e incorpora herramientas y conceptos de campos diversos (termodinámica, teoría de la información, teoría general de sistemas, ecología, matemática no-lineal, teoría del caos, geometría fractal, etc.), ya que los sistemas complejos no pueden ser comprendidos desde el análisis de sus partes, sino desde el contexto del todo mayor como sistema. Esto nos conduce a exponer la trama de conceptos utilizada para interpretar las peculiares formas y caracteres hallados en el pseudokarst de Jaizkibel.

La naturaleza es inexorablemente no-lineal. Los fenómenos no-lineales dominan mucho más el mundo inanimado de lo que creíamos y constituyen a la vez un aspecto esencial de los patrones en los sistemas vivos. En el mundo no-lineal, el cual incluye la mayor parte del mundo real, simples ecuaciones deterministas pueden producir una insospechada riqueza y variedad de comportamientos. Por otro lado, un comportamiento aparentemente desordenado y caótico puede dar lugar a estructuras ordenadas y hermosos patrones. La comprensión de la no-linealidad ha comportado un importante cambio de énfasis, del análisis cuantitativo al cualitativo. Otra propiedad importante de las ecuaciones no-lineales, que incomoda a los científicos mecanicistas, es que la predicción exacta es a menudo imposible, aunque las ecuaciones en sí puedan ser deterministas.

MATERIAL Y METODOS

Sucintamente se exponen los principales conceptos implicados en teoría de sistemas complejos, como paso previo para el análisis de los procesos que intervienen en la formación de cuevas y geoformas en el pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel. Especial énfasis es puesto en elucidar cómo ocurre la formación de patrones de disipación de energía en el acuífero intergranular, cómo actúan los procesos de disolución y precipitación, y cómo ocurre en último término la generación de cavidades y geoformas. Se utiliza un enfoque sistémico, que difiere de las concepciones analíticas usuales en estudios del karst, debido a que las geoformas presentan grandes diferencias con las halladas en el karst clásico. Este aspecto, precisamente, ha motivado la realización del presente trabajo.

RESULTADOS

PRIMERA PARTE

La perspectiva sistémica en la ciencia actual comporta un modo de pensar general, común a diversas disciplinas, que ha recibido el nombre de pensamiento sistémico. Las principales características del pensamiento sistémico emergieron simultáneamente en diversas disciplinas en el transcurso del siglo 20. Ello ha supuesto un cambio de paradigma desde visiones mecanicistas a otras que han sido denominadas ecológicas o sistémicas. La tensión básica se da entre las partes y el todo. El énfasis sobre las partes se ha denominado mecanicista, reduccionista o atomista, mientras que el énfasis sobre el todo recibe los nombres de holístico, organicista o ecológico, indistintamente. Sus principales características partieron de la biología, a través de la visión de los organismos vivos como totalidades integradas. Luego se enriqueció con aportes de la ecología (= biología de los ecosistemas), de la física cuántica, matemática no-lineal, neurobiología y muchos otros campos. Pero dado que su idea central se refiere a la naturaleza de la vida, conviene centrarse en primer lugar en su aplicación en biología.

La tensión entre mecanicismo y pensamiento sistémico en biología procede de la falsa dicotomía entre materia (estructura, cantidad) y forma (patrón, cualidad). En los organismos vivos la forma es algo más que una configuración estática de componentes en un todo. Hay un flujo continuo de materia a través del organismo mientras que su forma se mantiene. Hay también desarrollo y evolución. Por lo que la forma biológica está inextricablemente ligada a la comprensión de procesos metabólicos y de desarrollo.

En el alba de la filosofía de la ciencia occidental, los pitagóricos distinguían sustancia o materia y patrón, viendo a este último como algo que limitaba la materia y le daba forma. El tema tomaba la forma de preguntas ¿De qué está hecho?, o de preguntas ¿Cuál es su patrón? Los pitagóricos preferían inquirir sobre el patrón a hacerlo sobre la sustancia (Bateson, 1979).

Aristóteles, el primer biólogo de la tradición occidental, distinguía también entre materia y forma, pero al mismo tiempo las vinculaba mediante el proceso de desarrollo. En contraste con Platón, Aristóteles creía que la forma no tenía una existencia separada, sino que era inmanente en la materia y que ésta tampoco podía existir aisladamente de la forma. La materia contenía la naturaleza esencial de todas las cosas como potencialidad, y por medio de la forma (proceso de desarrollo) esta esencia se convertía en real. Materia y forma serían dos caras del proceso, separables sólo mediante la abstracción. El sistema formal de lógica que creó Aristóteles incluía un conjunto de conceptos unificadores, que dominaron el pensamiento científico durante un largo período.

Durante los siglos 16 y 17, la noción de un universo orgánico y viviente fue reemplazada por la del mundo como máquina, y ésta se convirtió en la metáfora dominante del capitalismo en la era moderna. El mecanicismo impulsó muy bien el desarrollo industrial, con descubrimientos científicos asociados principalmente a los nombres de Galileo, Descartes y Newton, entre otros, convirtiéndose esta concepción en la ideología dominante en los nuevos campos científicos.

Galileo excluyó la cualidad de la ciencia, restringiendo ésta al estudio de fenómenos que pudiesen ser medidos y cuantificados. Si bien ha sido una estrategia muy exitosa, introdujo importantes deformaciones. Como Capra (1988) señala, el programa de Galileo nos ofrece un mundo muerto: desaparecen las cualidades, la sensibilidad ética y estética, la conciencia, el alma y el espíritu. La experiencia como tal resulta excluida del discurso científico. Descartes creó a su vez el método de pensamiento analítico, consistente en desmenuzar los fenómenos complejos en partes para comprender desde las propiedades de éstas el funcionamiento del todo. Su visión

dividió la naturaleza en campos separados, el de la mente y el de la materia. El universo material, incluyendo los organismos vivos, era para Descartes una máquina que podía ser enteramente comprendida analizándola en términos de sus partes más pequeñas. El marco conceptual creado por Galileo y Descartes -el mundo como una máquina, gobernada por leyes matemáticas exactas- fue triunfalmente completado por Newton, cuya gran síntesis -la mecánica newtoniana- constituyó el logro culminante de la ciencia del siglo 17.

Los intentos de aplicar el modelo mecanicista para explicar funciones biológicas, como la digestión y el metabolismo, terminaron no obstante en fracaso. La situación cambió algo en el siglo 18, cuando Lavoisier, el padre de la química moderna, demostró que la respiración era una forma específica de oxidación, confirmando así la importancia de los procesos químicos en biología.

A la luz de la nueva química, los simplistas modelos mecanicistas fueron abandonados, pero la esencia de la idea cartesiana sobrevivió. A los animales se les seguía viendo como máquinas, si bien más complicadas que simples mecanismos de relojería, e incluyendo complejos procesos químicos. Consecuentemente, el mecanicismo cartesiano quedó expresado como dogma en la idea de que, en última instancia, las leyes de la biología podían ser reducidas a las de la física y la química.

A finales del siglo 18 y durante el siglo 19, el paradigma mecanicista encontró una fuerte oposición, que provino de un amplio movimiento en el arte, la literatura y la filosofía, principalmente alemana pero también británica. Figuras centrales de este movimiento fueron poetas y filósofos como Blake, Goethe o Kant. Goethe utilizó el término morfología para el estudio de la forma biológica desde una perspectiva dinámica y del desarrollo. Admiraba el "orden en movimiento" de la naturaleza y concebía la forma como un patrón de relaciones en el seno de un todo organizado. Esta comprensión cualitativa de los patrones o pautas, propia del pensamiento sistémico, le hacía enfatizar la explicación de propiedades de la materia y organismos en términos de formas visuales.

La comprensión de la forma orgánica también jugó un importante papel en la filosofía de Kant. En su discusión sobre la naturaleza de los organismos argumentaba que éstos, en contraste con las máquinas, son autorreproductores y autoorganizadores. La visión de la naturaleza como un todo armonioso, condujo a algunos científicos de la época a extender su búsqueda de patrones a la totalidad del planeta y a percibir a la Tierra como un todo integrado, prácticamente como un ser vivo, visión ésta análoga a la formulada en lenguaje científico moderno por la llamada hipótesis Gaia (Lovelock, 1979). Así por ejemplo, el geólogo Hutton sostuvo que los procesos geológicos y biológicos están conjugados. El reconocido naturalista Alexander von Humboldt llevó esta idea aún más lejos (Sachs, 1995): su costumbre de ver el planeta como un todo le llevó a identificar el clima con una fuerza global unificadora y a admitir la coevolución de organismos vivos, clima y corteza terrestre.

EMERGENCIA DE LAS CONCEPCIONES SISTÉMICAS

A lo largo del siglo 20, desde distintas disciplinas, emergió con rigor científico el pensamiento sistémico. Entre los principales autores se podría destacar a Oparín (origen de la vida), Prigogine (sistemas disipativos), Wiener & Shannon (cibernética y teoría de la información), Bateson (mente y naturaleza), Odum y Margalef (ecología), Maturana & Varela (autopoeisis y neurobiología), Gleick (teoría del caos), Mandelbrot (geometría fractal), Lovelock (hipótesis Gaia), Capra (el tao de la física y teoría de la complejidad). De modo especial este último autor ha presentado una síntesis comprensiva del conjunto del pensamiento sistémico (Capra, 1998, 2009) y parte de sus ideas son seguidas y resumidas en esta exposición.

A lo largo del siglo, no obstante, los avances sistémicos conviven con nuevas formulaciones mecanicistas. Cuando parecía que la física cuántica había logrado establecer que los sistemas son totalidades integradas que no pueden ser comprendidas en términos analíticos, el descubrimiento del código genético y la estructura del ADN, derivaron en la creencia de que todas las funciones biológicas podían ser explicadas por los genes. Esta grave distorsión se ha convertido en un excluyente modo de pensar, el cual domina en buena parte de las instituciones académicas y sumerge a una parte considerable de la investigación biológica en callejones sin salida, propios de los modelos mecanicistas.

Los problemas que se resisten al enfoque reduccionista de la genética molecular se han puesto de manifiesto de distintos modos. Mientras que los biólogos pueden conocer ahora la estructura de unos pocos genes, saben muy poco de los modos en que dichos genes se comunican y cooperan en el desarrollo de un organismo. En otras palabras, conocen el código de un alfabeto para la formación y ensamble de proteínas, pero no tienen ni idea de su sintaxis, y mucho menos de qué modo operan las propias proteínas (es decir, de su funcionamiento), las cuales contienen una complejidad mayor que la hallada en los genomas.

Cabe recordar que las proteínas son los componentes básicos de todos los organismos vivos; en cada célula puede haber, en cada momento, hasta 100 millones de ellas trabajando. Es muchísima actividad para intentar desentrañarla. Además, la conducta y las funciones de las proteínas no se basan simplemente en su composición química, como sucede con los genes, sino que depende también de las formas espaciales que adoptan. Una proteína debe tener para funcionar, no solo los componentes químicos necesarios adecuadamente ensamblados, sino que debe estar "plegada" de una forma específica. En realidad las proteínas se pliegan y enroscan adoptando formas que son extravagantes y complejas al mismo tiempo. Las proteínas, al estar compuestas de hasta 20 aminoácidos esenciales, proporcionan en su combinación un número de estructuras químicas distintas casi infinito. P.ej., para la insulina, que es una de las proteínas más simples, el número de estructuras químicas distintas es del orden de 10^{65} . Este es un número increíblemente grande si se considera que el número total de átomos de nuestra galaxia es de 10^{68} (Bohinski, 1991).

Esta extraordinaria complejidad se puede tratar de entender a diferentes niveles, no al simple nivel genético, y de hecho hoy se acepta que la mayoría de los procesos biológicos implicados en desarrollo y evolución son epigenéticos (Galán, 2010). Pero hay también una simplicidad subyacente, debida a una unidad subyacente igual de elemental en la vida. Todos los procesos químicos que

animan las células (los esfuerzos cooperativos de los nucleótidos, la transcripción del ADN en ARN, etc.) evolucionaron sólo una vez y se han mantenido bastante bien fijados desde entonces en toda la naturaleza. Todo ser vivo es una ampliación de un único proceso evolutivo. La vida surge del desarrollo de la materia y se diversifica. Los seres humanos somos simples incrementos en una rama o línea evolutiva: un archivo de adaptaciones, modificaciones y retoques que se remonta hasta 3.800 millones de años atrás. Estamos además muy íntimamente emparentados con los demás seres vivos. P.ej., la mitad, más o menos, de las funciones químicas que se presentan en un plátano son fundamentalmente las mismas que las que se producen en los seres humanos. Conviene reiterarlo: la vida es toda una. Esa es, y sospecho que será siempre, la más profunda y veraz de las afirmaciones.

Desde Newton, los físicos habían pensado que todos los fenómenos físicos podían ser reducidos a las propiedades de las partículas elementales. La teoría cuántica estableció sin embargo que los objetos materiales se disuelven a nivel subatómico en pautas de probabilidades en forma de ondas. Estas pautas o patrones no representan además probabilidades de cosas, sino más bien interconexiones (en el interior de sistemas). Las partículas subatómicas no son "cosas" sino interconexiones entre cosas, y éstas a su vez interconexiones entre otras cosas. La física cuántica puso en evidencia que no podemos descomponer el mundo en unidades elementales independientes. Al descender de objetos macroscópicos a átomos y partículas subatómicas, la naturaleza no muestra componentes aislados, sino una compleja trama de relaciones entre las diversas partes de un todo unificado. En palabras de Heisenberg: el mundo aparece como una compleja trama interconectada, donde conexiones de distinta índole se superponen o se combinan, determinando así la textura del conjunto.

En la teoría cuántica las relaciones se expresan en términos de probabilidades que son determinadas por la dinámica de todo el sistema. Mientras que en el paradigma cartesiano y en la mecánica newtoniana, las propiedades y el comportamiento de las partes determinan las del conjunto, en la mecánica cuántica la situación se invierte: es el todo el que determina el funcionamiento de las partes (Heisenberg, 1971).

En ecología se llegó también a la visión de que los sistemas vivos están constituidos por organismos, partes de organismos, y comunidades de organismos; todos ellos totalidades integradas cuyas propiedades esenciales emergen de las interacciones e interdependencia de sus partes, conseguida a lo largo de miles de millones de años de evolución. Los organismos están vinculados por redes, y los flujos de materia y energía a través de los ecosistemas interactúan también en forma de redes con otros sistemas. En otras palabras, la trama del mundo viviente (= biosfera) está constituida por redes dentro de redes.

TEORIA GENERAL DE SISTEMAS

En el pensamiento sistémico, el énfasis se traslada de las partes al todo. Las propiedades esenciales o sistémicas son propiedades del conjunto, que ninguna de las partes tiene por sí sola. Emergen de la configuración de relaciones que caracteriza al sistema. Las propiedades sistémicas quedan destruidas cuando se disecciona el sistema en elementos aislados. A través del mundo viviente nos encontramos con sistemas dentro de sistemas. A distintos niveles sistémicos corresponden distintos niveles de complejidad. En cada nivel, los fenómenos observados poseen propiedades que no se dan a niveles inferiores. En última instancia, lo que denominamos partes, es meramente un patrón dentro de una inseparable red de relaciones. Al percibir la realidad como una red de relaciones, la metáfora del conocimiento como construcción queda reemplazada por la de la red.

Una implicación importante de la visión de la realidad como red, afecta al concepto tradicional de objetividad científica. En el paradigma científico cartesiano, las descripciones son consideradas objetivas, es decir, independientes del observador humano que las hace y del proceso de conocimiento. El nuevo paradigma implica que la epistemología (= la comprensión del proceso de conocimiento) debe ser incluida explícitamente en la descripción de los fenómenos naturales. Se puede comprender que aislar un patrón, dentro de una red compleja, dibujando una frontera aleatoria, y denominarlo un "objeto" es un tanto arbitrario. Y esto sucede a menudo cuando nos referimos a objetos de nuestro entorno. P.ej., cuando vemos una red de relaciones entre hojas, ramitas, ramas y tronco, la llamamos "árbol". Pero en su delimitación seguramente la mayoría se olvidará de las raíces, que pueden ser más extensas que las partes del árbol que vemos. En un bosque, además, las raíces de todos sus árboles están entremezcladas, formando una densa red subterránea en la que no existen fronteras precisas entre árboles individuales. En resumen, lo que denominamos árbol depende de nuestras percepciones. En ciencia se acostumbra a decir que depende de nuestro método, de nuestras observaciones y de nuestras mediciones. En palabras de Heisenberg y Einstein, lo que observamos no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de observación. El pensamiento sistémico comporta así un cambio de ciencia objetiva a ciencia epistémica. El pensamiento sistémico lleva a ver que no existe conocimiento absoluto, sino sólo aproximado; el conocimiento científico avanza por sucesivas aproximaciones; la ciencia nunca puede facilitar una comprensión completa y definitiva.

TERMODINAMICA

Aunque el término "sistema" había sido utilizado en distintos momentos, debemos a Bertalanffy (1950) la teoría de los sistemas abiertos en física y biología. Con el apoyo de la cibernética, el pensamiento sistémico quedó establecido como movimiento científico mayor, y su base de sostén estuvo en la termodinámica.

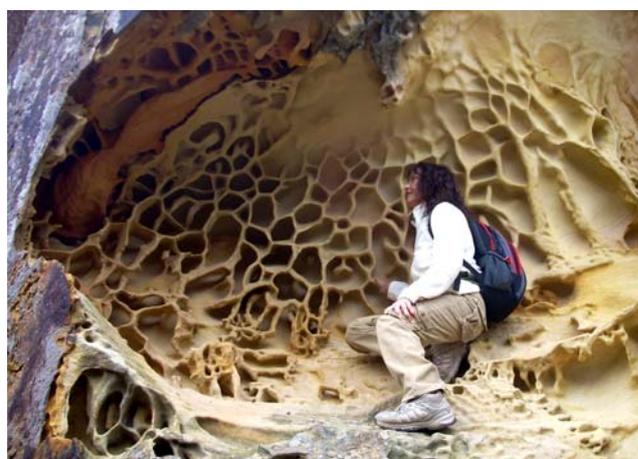


Figura 1. En la arenisca de Jaizkibel la disolución y precipitación en el interior del acuífero genera patrones de celdas poligonales (= boxworks), bandas de coloración, y una gran diversidad de geoformas, desconocidas para el karst clásico. Su evolución es impulsada por la reactividad química de las soluciones y mecanismos de disipación de energía, propios de sistemas complejos.



Figura 2. Geoformas en cuevas del pseudokarst de Jaizkibel. Procesos de difusión y convección multicomponente originan patrones diversos de disolución y precipitación, celdas poligonales, anillos de Liesegang y bandeados rítmicos de distintos colores.

El dilema que más había desafiado a los científicos hasta 1940 se puede definir como la oposición entre la mecánica newtoniana, ciencia de fuerzas y trayectorias, y el pensamiento evolucionista, ciencia de cambio, crecimiento y desarrollo. La segunda ley de la termodinámica fue formulada por Carnot en términos de tecnología para motores térmicos, estableciendo que en los fenómenos físicos hay una tendencia a pasar desde el orden hacia el desorden. Todo sistema físico aislado o "cerrado" procederá espontáneamente en la dirección de un creciente desorden. Para expresar en términos matemáticos esta tendencia, los físicos introdujeron una nueva medida que llamaron "entropía". Según la segunda ley, la entropía de un sistema físico cerrado irá incrementándose, y esta evolución irá acompañada de un creciente estado de desorden. Así, con el concepto de entropía y la segunda ley, la termodinámica introducía la idea de procesos irreversibles, de un "vector de tiempo" en la ciencia. Según la segunda ley, parte de la energía mecánica queda siempre disipada en forma de calor y no puede ser recuperada. Así, el mundo-máquina estaría inmerso en un proceso de agotamiento que le llevaría irremisiblemente a un punto final.

Esta negra imagen mecanicista de la evolución cósmica contrastaba con el pensamiento evolucionista, que observaba que el universo viviente evolucionaba del desorden al orden, hacia estados de creciente complejidad. Eran dos visiones opuestas: la de un mundo vivo desplegándose hacia un creciente orden y complejidad, y la de un motor en agotamiento, un mundo en creciente desorden.

Bertalanffy dio un paso crucial para resolver el dilema al afirmar que el organismo no es un sistema estático cerrado al exterior, conteniendo siempre los mismos elementos; es un sistema abierto en un estado cuasi estable en el que la materia continuamente entra desde, y sale hacia, el medio exterior (Bertalanffy, 1968). A diferencia de los sistemas cerrados, que se instalan en un estado de equilibrio térmico, los sistemas abiertos se mantienen lejos del equilibrio en un estado "estable" caracterizado por un continuo flujo y cambio de materia y energía. La termodinámica clásica, que trata de sistemas cerrados en o cerca del equilibrio, resulta así inadecuada para describir sistemas abiertos en estados estables lejos del equilibrio. La formulación en lenguaje matemático de la termodinámica de sistemas abiertos fue lograda por Prigogine (1967) y Prigogine & Glansdorff (1980) a través de la formulación de la teoría de las estructuras disipativas en los sistemas químicos.

En este marco, además de reevaluarse la segunda ley, cambiaron radicalmente los conceptos de orden y desorden, y se postuló la autorregulación como otra propiedad clave de los sistemas abiertos. La teoría general de sistemas ofrecía así la posibilidad de aplicar similares principios en distintos campos de estudio, precisamente porque éstos están relacionados con sistemas y porque muchas leyes y principios son de aplicación a los sistemas con independencia de su naturaleza. Al mismo tiempo, al formular criterios exactos, la teoría general de sistemas es una defensa conveniente contra analogías superficiales sin utilidad para la ciencia (Bertalanffy, 1968).

CIBERNETICA

Los intentos de desarrollar máquinas autorreguladas llevaron en los años 1950 a un grupo de matemáticos, neurocientíficos e ingenieros -entre ellos Wiener, von Neumann, Shannon- a formar un campo de investigación nuevo, la cibernética. Sus investigaciones les condujeron a los conceptos de retroalimentación, autorregulación, y autoorganización. Wiener, en especial, reconocía que los patrones de organización implícitos en la biología organicista se referían a pautas de organización, es decir, entidades inmateriales. El desarrollo de la cibernética llevó a desarrollar las teorías de la información, de la comunicación, y los ordenadores digitales, además de arrojar luz para avanzar en la comprensión del funcionamiento del cerebro.

Uno de sus aportes cruciales fue entender la importancia de la retroalimentación o feedback. La presencia en los sistemas vivos de bucles de retroalimentación (= feedback loops) se traduce en la capacidad de autorregulación de todo el sistema, y este es el mecanismo esencial de la homeostasis, la cual permite a los organismos mantenerse en un estado de equilibrio dinámico. Los loops de retroalimentación son patrones abstractos, de relaciones, en estructuras físicas o en actividades de organismos vivos. Los cibernéticos distinguieron claramente, por primera vez, entre la estructura física de un sistema y su patrón de organización, distinción crucial para la teoría contemporánea de los sistemas vivos (Maturana & Varela, 1972, 1990).

PATRONES

Desde el punto de vista sistémico, la comprensión de la vida comienza con la comprensión del patrón. En el estudio de la estructura medimos y pesamos cosas. Los patrones, en cambio, no pueden ser medidos ni pesados; deben ser cartografiados. Para entender un patrón debemos cartografiar una configuración de relaciones. En otras palabras, estructura implica cantidades, mientras que patrón implica cualidades. Las propiedades sistémicas emergen de una configuración de relaciones ordenadas, es decir, son propiedades de un patrón. Cuando un sistema vivo es diseccionado, lo que se destruye es su patrón; sus componentes siguen ahí, pero el patrón ha sido destruido y en consecuencia el organismo muere.

La mayoría de los científicos reduccionistas no pueden comprender la crítica al reduccionismo porque no llegan a entender la importancia del patrón. Creen que todos los organismos están hechos de átomos y moléculas, y que por tanto las leyes de la biología pueden ser reducidas a las de la física y la química. Si bien es cierto que los organismos están hechos de átomos y moléculas, son algo más que eso, algo inmaterial e irreductible: el patrón de organización.

En todos los seres vivos existe un patrón de organización común, y sus componentes están dispuestos en forma de redes. La primera y más obvia propiedad de cualquier red es su no-linealidad, va en todas direcciones. Por lo tanto, las relaciones en un patrón en

red son relaciones no-lineales. En particular esto permite que un estímulo o mensaje pueda viajar en un camino cíclico, que puede de ese modo convertirse en un loop de retroalimentación.

AUTOORGANIZACION

El concepto de autoorganización se originó en los primeros años de la cibernética, cuando los científicos comenzaron a construir modelos matemáticos para representar la lógica inherente a las redes neuronales presentes en la actividad nerviosa. Trabajando con simples redes binarias -elementos que pueden ser conectados en on o en off (en marcha o paro), donde los nodos on-off están acoplados de modo tal que la actividad de cada nodo esté comandada por la actividad previa de otros, según reglas determinadas de conexión-, fueron capaces de demostrar que las redes binarias, aunque constituyen modelos simplificados, son buenas aproximaciones a las redes del sistema nervioso.

Construyendo modelos binarios, con bombillas que se encendían y apagaban en los nodos, descubrieron con gran asombro que, tras algún tiempo de parpadeos aleatorios, emergían algunos patrones ordenados en la mayoría de las redes. Podían observar ondas de parpadeos fluyendo a través de la red, o bien ciclos repetidos. Aun cuando el estado inicial de la red fuera escogido al azar, al cabo de un tiempo emergían espontáneamente patrones ordenados. A esta emergencia espontánea de orden se la llamó "autoorganización" (McCulloch & Pitts, 1943; Ashby, 1947, 1956; Capra, 1998). Para definir el incremento de orden implicado por la organización se creó el concepto de redundancia, el cual mide el orden relativo del sistema en relación con el máximo desorden posible en el mismo. En los sistemas vivos, un sistema autoorganizador no importa simplemente orden desde su entorno, sino que absorbe materia rica en energía y la integra en su propia estructura, aumentando así su orden interno.

La principal diferencia entre los sistemas cibernéticos y los modelos posteriores elaborados para seres vivos, estriba en que éstos incluyen la creación de nuevas estructuras y nuevos modos de comportamiento, lo que resulta esencial en los procesos de desarrollo y evolución. Una segunda característica, es que se trata de sistemas abiertos, operando lejos del equilibrio; es necesario un flujo constante de materia y energía a través del sistema para que tenga lugar la autoorganización. Y en tercer lugar, una característica común a todos los modelos de autoorganización, es la interconectividad no-lineal de los componentes del sistema. Esta pauta de no-linealidad se traduce físicamente en loops de retroalimentación.

ESTRUCTURAS DISIPATIVAS

La teoría de las estructuras disipativas, del Nóbel ruso Ilya Prigonine (1967), fue la primera formulación detallada de los sistemas autoorganizadores, la cual tendría ulteriores desarrollos (Prigonine & Glandsdorff, 1971; Prigonine & Stengers, 1984). La observación de que los organismos vivos son capaces de mantener sus procesos vitales bajo condiciones de no-equilibrio, lo condujo a investigar las condiciones precisas que se requieren para que las condiciones de no-equilibrio sean estables. Se dio cuenta entonces de que los sistemas lejos del equilibrio deben ser descritos por ecuaciones no-lineales. El reconocimiento de la relación entre condiciones lejos del equilibrio y no-linealidad abrió a Prigonine una vía de investigación que una década después culminaría en su teoría.

En orden a resolver el puzzle de la estabilidad lejos del equilibrio, Prigonine no estudió los sistemas vivos, sino que se concentró en el fenómeno más sencillo de la convección de Bénard (1900), considerada ahora un caso clásico de autoorganización (Koschmieder, 1993). A continuación, en el siguiente apartado, expondremos con mayor detalle las características de la convección de Bénard, ya que procesos similares están involucrados en la formación de los patrones que encontramos en las geoformas de Jaizkibel. Pero antes es pertinente señalar que el análisis de Prigonine demostró que, mientras las estructuras disipativas reciben su energía del exterior, las inestabilidades y saltos a nuevas formas de organización son el resultado de fluctuaciones internas, amplificadas por loops de retroalimentación positiva. Así, la disipación de energía, contemplada tradicionalmente como generadora de desorden en los sistemas cerrados, aparece como fuente de un nuevo orden y complejidad en los sistemas abiertos.

CONVECCION DE BÉNARD Y FORMACION DE PATRONES

El físico francés Bénard descubrió que el calentamiento de una fina capa de líquido puede originar estructuras extrañamente ordenadas. Cuando el líquido es calentado desde abajo, se establece un flujo constante de calor, que se mueve desde el fondo hacia la parte superior. El líquido en sí mismo permanece en reposo y el calor se transmite únicamente por conducción. No obstante, si la diferencia de temperatura entre la parte superior y el fondo alcanza un determinado valor crítico, el flujo de calor es reemplazado por una convección térmica, en la que el calor es transmitido por el movimiento coherente de grandes cantidades de moléculas.

En este punto, se forma un sorprendente patrón ordenado de celdas hexagonales (en forma de colmena), en el cual el líquido caliente asciende por el centro de las celdas, mientras que el líquido más frío desciende por las paredes de las celdas. El estudio de Prigonine de este patrón de convección demostró que, a medida que el sistema se aleja del equilibrio (es decir, de un estado de temperatura uniforme a través del líquido), alcanza un punto crítico de inestabilidad, en el que aparece el patrón hexagonal ordenado.

La inestabilidad de Bénard es un espectacular ejemplo de autoorganización. El desequilibrio mantenido por el flujo de calor a través del sistema, genera un patrón espacial en el que millones de moléculas se mueven coherentemente para formar las celdas hexagonales de convección. Las celdas de Bénard no se limitan a los experimentos de laboratorio, sino que se dan en la naturaleza en una gran variedad de circunstancias. P.ej., el flujo de aire caliente desde la superficie de la tierra hacia el espacio puede generar vórtices hexagonales de circulación que dejan sus correspondientes huellas en las dunas de desiertos y en los campos de nieve árticos.

Otro curioso ejemplo estudiado por Prigogine son los llamados relojes químicos. Estos son reacciones lejos del equilibrio químico, que producen oscilaciones periódicas sorprendentes. P.ej., si hay dos clases de moléculas en la reacción, unas "rojas" y otras "azules", el sistema será enteramente azul en un determinado momento, para cambiar luego súbitamente su color al rojo, después de nuevo al azul y así sucesivamente a intervalos regulares; para cambiar todo su color súbitamente, el sistema químico debe actuar como un todo, produciendo un alto nivel de orden a través de la actividad coherente de millones de moléculas. Como en el caso de Bénard, este comportamiento coherente emerge espontáneamente en puntos críticos de inestabilidad lejos del equilibrio (Prigogine & Stengers, 1984). Condiciones experimentales distintas podrán producir también ondas de actividad química. Así p.ej., en la llamada reacción de Belousov se forman rizos helicoidales, de cuya interferencia emerge un patrón en bandas de color paralelas, las cuales se propagan concéntricamente (Prigogine, 1980). La disipación de energía en los sistemas abiertos es así una fuente de orden.

Subsecuentes trabajos de muchos otros investigadores han mostrado que patrones análogos a los citados pueden formarse en la naturaleza por reactividad química, difusión y convección (Semwogerere & Schaltz, 2001). Una recopilación de casos fue presentada en Galán & Nieto (2010). Su formación no obedece sólo a gradientes térmicos, sino que también puede estar gobernada por gradientes de concentración, que alteran la densidad de las soluciones, generando actividad convectiva que origina patrones, tanto de tipo hexagonal y poligonal, como en ondas concéntricas (Nagy & Pojman, 1993), sobre todo cuando la convección involucra a soluciones químicas con varios componentes (= convección multicomponente). Así, los sistemas químicos constituidos por soluciones reactivas de varias sustancias pueden formar patrones complejos, entre ellos, patrones hexagonales, patrones concéntricos, digitaciones salinas, rizos y plumas termales (Simoyi, 1999). En la cinética de las reacciones que tienen lugar en el acuífero intergranular en la arenisca de Jaizkibel, las sustancias que reaccionan en primer lugar pueden generar ondas que inducen (según su tasa de difusión, concentración de las sustancias, y forma y tamaño de campo) la precipitación rítmica y cementación en patrones diversos (Galán & Nieto, 2010).

TEORÍA LÁSER

La retroalimentación o feedback puede ser positiva o negativa. Si produce un cambio en el que el estado resultante es de dirección opuesta al estímulo inicial, se dice que el feedback es negativo, y ello genera autorregulación. Si por el contrario el cambio ocurre en la misma dirección, se dice que el feedback es positivo, y ello conduce a una amplificación o refuerzo. Las inestabilidades y saltos a nuevas formas de organización son el resultado de fluctuaciones internas, amplificadas por loops de retroalimentación positiva.

Cuando el fenómeno láser fue descubierto, se interpretó como un proceso de amplificación, que Einstein ya había predicho en su teoría cuántica. Los átomos emiten luz al ser excitados, es decir, cuando sus electrones han sido ascendidos a órbitas superiores. Al cabo de un tiempo, los electrones descienden espontáneamente a órbitas inferiores y en el proceso emiten energía en forma de pequeñas ondas luminosas. Un rayo de luz normal consiste en una mezcla incoherente (desordenada) de estas ondas emitidas por átomos individuales. Bajo determinadas circunstancias, no obstante, una onda luminosa puede estimular -o como Einstein decía, inducir- a un átomo excitado a emitir su energía de tal modo que la onda de luz se amplifique. Esta onda amplificada puede, a su vez, estimular a otro átomo a amplificarla aún más, hasta que finalmente se produce una avalancha de amplificaciones. El fenómeno resultante es llamado Láser (de sus siglas: Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation). Pero ¿qué hace que las diferentes avalanchas de luz se combinen para producir un flujo único y coherente? Haken (1983) halló la respuesta al observar que un láser es un sistema multicomponente lejos del equilibrio térmico. Necesita ser bombeado desde el exterior para la excitación de los átomos, que entonces irradian energía. Hay pues un flujo constante de energía a través de un sistema abierto.

Haken (1987) mostraba así en su completa teoría no-lineal láser, que el láser es un sistema autoorganizador alejado del equilibrio y que la acción láser se produce cuando la intensidad del bombeo exterior alcanza un cierto valor crítico. Debido a la especial disposición de espejos en ambos extremos de la cavidad del tubo láser, sólo la luz emitida muy cerca de la dirección del eje principal de éste puede permanecer en la cavidad por tiempo suficiente para producir el proceso de amplificación, mientras que todas las restantes series de ondas son eliminadas. La teoría de Haken deja claro que, si bien el láser precisa de un enérgico bombeo externo para permanecer en un estado lejos del equilibrio, la coordinación de las emisiones es producida por la propia luz láser; se trata pues de un proceso de autoorganización. Se llegaba así a una descripción independiente de un fenómeno de autoorganización del tipo que Prigogine llamaría una estructura disipativa.

El láser puede situarse en la encrucijada entre física cuántica y clásica, entre los fenómenos en equilibrio y en no-equilibrio, entre las transiciones de fase y la autoorganización, y entre la dinámica ordinaria y la del caos. Al mismo tiempo, es un sistema que podemos comprender a la vez en los niveles microscópico-cuántico y clásico-macroscópico (Graham, 1987).



Figura 3. El mundo real es predominantemente no-lineal. La teoría del caos sostiene que no hay líneas simples en la naturaleza: cualquier línea, vista a una escala diferente, resulta ser una sucesión de formas, de irregularidades, curvas, etc. El caos también sugiere que nada tiene justo una, dos o tres dimensiones, sino que está "a medias" entre ellas y que estas dimensiones son fractales y no lineales. Representaciones artísticas con fractales o falsificaciones fractales.



Figura 4. Atractores extraños, fractales, series de Julia, y diseños artísticos con figuras fractales. (1) atractor de Lorenz. (2) y (3) otros atractores extraños. (4) un fractal análogo a biomorfos. (5) y (6) diseños artísticos fractales. (7) y (8) diseños en base a series de Julia. Nótese la frecuencia de formas helicoidales y las que recuerdan a colas de hipocampo. (9) diseño fractal similar a los de efectos de tipo Bénard-Marangoni, debidos a difusión y convección.

HIPERCICLOS

Mientras que Prigogine y Haken llegaron al concepto de autoorganización a través del estudio de sistemas físicos y químicos, el bioquímico Eigen (1971), Nobel de química, utilizó el mismo concepto para arrojar luz sobre el rompecabezas del origen de la vida. Oparin (1922) ya había establecido tempranamente que el origen de la vida sobre la Tierra era el resultado de un proceso de organización progresiva de la materia, con el paso de la materia inorgánica a la orgánica y después a la materia viva, en una concepción sistémica basada en la autoorganización de la materia y formación de crecientes niveles de complejidad.

Eigen apreció que la autoorganización ocurría en sistemas químicos alejados del equilibrio, involucrando "hiperciclos", con loops de feedback múltiples. Así postuló una fase prebiológica de evolución en la que la autoorganización ocurría en el ámbito molecular. Los sistemas estudiados por Eigen son conocidos como ciclos catalíticos.

Un catalizador es una sustancia que incrementa el nivel de una reacción química, sin cambiar en sí misma durante el proceso. Las reacciones catalíticas son cruciales en bioquímica (Bohinski, 1991). Los catalizadores más comunes y eficientes son las enzimas, componentes celulares esenciales que promueven los procesos metabólicos vitales. En los estudios de Eigen y sus colegas sobre reacciones catalíticas, incluyendo enzimas, observaron que en los sistemas alejados del equilibrio (p.ej., expuestos a flujos de energía), se combinan diferentes reacciones catalíticas para formar redes, que suelen contener loops cerrados. Estos ciclos catalíticos son el centro de los sistemas químicos autoorganizadores y son notablemente estables. Con tiempo suficiente y un flujo de energía, los ciclos tienden a entrelazarse para formar loops cerrados en los que las enzimas producidas en un ciclo actúan como catalizadores del ciclo subsiguiente. Acuñó el término "hiperciclo" para tales loops, en los que cada vínculo es un ciclo catalítico.

Los hiperciclos no sólo son estables, sino capaces de autorreproducirse y de corregir errores de reproducción, lo que significa que pueden conservar y transmitir información compleja. La teoría de Eigen demuestra que la autorreplicación -característica de los seres vivos- puede haber ocurrido en sistemas químicos antes de que apareciera la vida, con anterioridad a la formación de la estructura genética. Estos hiperciclos químicos deben ser vistos como precursores de los sistemas vivos. Y una de las propiedades más notables de los hiperciclos es que son capaces de evolucionar pasando por inestabilidades y creando niveles sucesivos de mayor complejidad, con una diversidad creciente.

LA HIPOTESIS GAIA

Las ideas clave subyacentes en las teorías y modelos arriba descritos, cristalizaron en la hipótesis Gaia, de Lovelock (1979), y en la teoría de la autopoiesis (=organización de la materia viva, sistema nervioso y mente) de Maturana & Varela (1990), que no abordaremos aquí por su extensión, pero que recomendamos consultar a los interesados en comprender la complejidad de vida y mente.

Lovelock tenía una intuición que le condujo a formular un modelo que es quizás la más hermosa expresión de autoorganización: la idea de que el planeta Tierra, como un todo, es un sistema autoorganizador vivo.

Los orígenes de la hipótesis Gaia se basan en la observación de que la característica más general de la vida es que los organismos toman materia y energía y expulsan desechos. Los desechos, procesados por microorganismos, reincorporan de nuevo al ciclo de la vida elementos químicos en forma de nutrientes. La vida, al menos tal como la conocemos, necesita atmósfera y océanos, como medio fluido para los intercambios de materias primas y desechos. La atmósfera terrestre contiene gases, como el oxígeno y el metano, capaces de reaccionar entre sí, pero también de coexistir en altas proporciones, originando una mezcla lejos del equilibrio químico.

Lovelock se dio cuenta de que este estado (sistema abierto lejos del equilibrio) debía ser consecuencia de la presencia de vida en la Tierra, la cual actuaría regulando su composición en un nivel favorable para los organismos. Sabía por los astrofísicos que el calor del sol se ha incrementado un 25% desde el inicio de la vida sobre la Tierra y que, a pesar de dicho aumento, la temperatura en la superficie se ha mantenido casi constante durante 4 mil millones de años. Esto sugería que la presencia de vida podía actuar autorregulando la temperatura y, tal vez, otras condiciones planetarias (composición de la atmósfera, salinidad de los océanos, etc.). Por su parte, Margulis (1989) estaba estudiando la producción y eliminación de gases por diversos organismos, especialmente las bacterias del suelo, las que aportaban también muchos otros gases atmosféricos. La colaboración entre ambos investigadores permitió develar una compleja red de loops de retroalimentación, que era la responsable de la autorregulación del planeta, y que vinculaba sistemas vivos (plantas, microorganismos y animales) con sistemas no vivos (rocas, océanos y atmósfera) (Margulis, 1989).

Otros investigadores ya habían constatado partes del proceso. P. ej., Margalef (1974) no sólo identificaba ciclos actuales de materia y energía a través de ecosistemas, océano y atmósfera, sino que efectuaba una de las exposiciones más claras de cómo la fotosíntesis era la responsable del cambio de las primitivas condiciones reductoras de la atmósfera terrestre a las actuales condiciones oxidantes. El notable incremento de la concentración de oxígeno en el aire, que las visiones mecanicistas sólo perciben como una característica inorgánica del planeta, es por el contrario el resultado de la evolución orgánica. De igual modo, gran parte del CO₂ (importante gas de efecto invernadero) es retirado de la atmósfera por los organismos y fijado en la madera de la vegetación y exoesqueletos de diversos organismos. Por tanto la biosfera contribuye en una medida nada despreciable a perfilar y regular muchas de las características que hoy posee el planeta. El tan mencionado "calentamiento global", que en realidad es una subida acentuada de la concentración de CO₂ en la atmósfera más que de la temperatura, no es sólo debido a la actividad industrial y quema de combustibles fósiles, sino a la vez, a la eliminación de grandes extensiones de vegetación arbórea, cuya madera permitía su almacenamiento.

La hipótesis Gaia postula que existe una íntima relación entre las partes vivas y no vivas del planeta. Los principales ciclos aún llamados “geoquímicos” permiten comprobar esto. P.ej., si consideramos el ciclo del CO₂, vemos que los volcanes lo han producido y enviado a la atmósfera en grandes cantidades durante millones de años. Para que la superficie del planeta no alcance una temperatura inhóspita para la vida, la biosfera necesita retirarlo de la atmósfera. Los animales y las plantas reciclan cantidades masivas de oxígeno en sus procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición. Estos cambios se mantienen en equilibrio y casi no afectan al nivel de CO₂ en la atmósfera. El exceso de CO₂ atmosférico es absorbido y reciclado a través de un extenso loop de retroalimentación, que incluye la erosión de las rocas como elemento clave.

En el proceso de erosión de las rocas, éstas se combinan con el agua de lluvia y con el CO₂ para formar diversos compuestos químicos, principalmente carbonatos. El CO₂ es retirado de la atmósfera y disuelto en soluciones líquidas. Hasta aquí el proceso es puramente químico. Pero Lovelock y otros descubrieron que la presencia de bacterias en el suelo incrementa considerablemente la erosión. En cierto sentido, las bacterias del suelo actúan como catalizadores del proceso de erosión de las rocas, de modo que todo el ciclo del CO₂ puede contemplarse como el equivalente biológico de un ciclo catalítico. Los carbonatos son luego transportados a los océanos, donde algas microscópicas (y corales) los absorben para construir sus caparazones de carbonato cálcico. Así, buena parte del CO₂ que estaba en la atmósfera acaba convertido en exoesqueletos de algas y animales. Cuando estos organismos mueren, sus caparazones forman sedimentos masivos carbonáticos (calizas y margas) o aportan carbonatos a la diagénesis de otras rocas, las cuales -en zonas de subducción- se pueden hundir gradualmente en el manto terrestre, fundiéndose. Parte del CO₂ contenido en las rocas fundidas será reenviado a la atmósfera por los volcanes, para iniciar otra vuelta en el ciclo.

El ciclo entero -que vincula volcanes, erosión de las rocas, bacterias del suelo, algas oceánicas, sedimentos de caliza y de nuevo volcanes- actúa como un gigantesco ciclo de retroalimentación que contribuye a la regulación de la temperatura de la Tierra. Ciclos similares -que comprenden plantas y rocas, animales y gases atmosféricos, microorganismos y océanos- regulan el clima de la Tierra, la salinidad de sus océanos y otras importantes constantes planetarias.

NO-LINEALIDAD

Al principio, la hipótesis Gaia se encontró con una fuerte resistencia de la comunidad científica a adoptar esta nueva visión de la vida y del planeta. Revistas académicas prestigiosas, tales como *Science* y *Nature*, rechazaron incluso publicarla. Lovelock y Margulis desafiaban los conceptos establecidos de que la geología, la biología y la química atmosférica eran ciencias separadas, y de que las fuerzas de la geología eran las únicas que marcaban las condiciones para la vida sobre la Tierra. Pero los animales y plantas no son meros pasajeros que hallaron por casualidad las condiciones adecuadas para su evolución, sino que ha sido la evolución inorgánica y luego la vida misma la que ha creado las condiciones aptas para su propia existencia. El principal argumento implícito en el rechazo de la teoría Gaia era que la hipótesis no podía ser científica porque era teleológica, es decir, que implicaba la idea determinista de procesos naturales conformados con un propósito. Pero ninguno de sus autores sostuvo nunca que la autorregulación planetaria estuviera dotada de un propósito, como tampoco lo sostiene la teoría de la evolución. Pero el pensamiento mecanicista aún se debate con la vieja metáfora de Dios como relojero. Afortunadamente, la visión sistémica se ha ido extendiendo, y hoy se contempla la autoorganización de la naturaleza como un hecho real. Diversos equipos de investigación en distintos campos siguen avanzando en formulaciones más detalladas de la misma (ver p.ej.: Bateson, 1979; Capra, 1998), aunque es discutible qué partes de la corteza o del globo intervienen en la autorregulación de la biosfera y del planeta.

Las teorías y modelos descritos tratan con sistemas complejos, que comprenden miles de reacciones químicas interdependientes. En las últimas décadas ha aparecido un nuevo conjunto de conceptos y técnicas para tratar con esta enorme complejidad, conjunto que ha empezado a formar un marco matemático coherente. Y que se conoce como teoría de los sistemas complejos o dinámica no-lineal. Esta es una teoría esencialmente matemática, cuyos conceptos y técnicas se aplican a un amplio espectro de fenómenos. Lo mismo puede decirse de la teoría del caos y de teoría fractal, que son importantes ramas de la dinámica no-lineal. Todas ellas son herramientas que permiten dotar de mayor rigor científico a las formulaciones sistémicas, ya que los nuevos patrones cualitativos de los sistemas complejos son básicamente no-lineales.

Cuando la relación entre dos variables de una ecuación simple de tipo $y = x + 1$ es representada en un gráfico de coordenadas cartesianas, corresponde a una línea recta, y las ecuaciones de este tipo son llamadas ecuaciones lineales. De modo similar, una ecuación de tipo $y = x^2$ es representada en un gráfico de coordenadas cartesianas por una parábola, y las ecuaciones de este tipo, correspondientes a curvas, se denominan ecuaciones no-lineales. Tienen la característica de que una o varias de sus variables están elevadas a potencias.

En la física clásica, cuando se trataba con fenómenos naturales complejos -como flujos turbulentos de agua y aire- se planteaban ecuaciones no-lineales, pero dado que éstas eran demasiado complejas para resolverlas, los científicos evitaban generalmente su estudio. Frecuentemente, cuando aparecían ecuaciones no-lineales eran inmediatamente “linealizadas”, es decir, reemplazadas por aproximaciones lineales. De este modo, en lugar de describir los fenómenos en toda su complejidad, se suavizaban o redondeaban. Este hábito arraigó tanto que muchas ecuaciones eran linealizadas *mientras se planteaban*, de modo que los textos científicos ni tan siquiera incluían su versión no-lineal íntegra. Consecuentemente, la mayoría de científicos e ingenieros llegaron a creer que todos los fenómenos naturales podían -virtualmente- ser descritos por ecuaciones lineales. Adicionalmente, una cosa es plantear las ecuaciones, y otra muy distinta resolverlas. No obstante, la reciente exploración de los sistemas no-lineales ha obligado a reconsiderar nociones

muy básicas sobre las relaciones entre un modelo matemático y el fenómeno que describe. Una de ellas concierne a lo que entendemos por simplicidad y complejidad.

En el mundo de las ecuaciones lineales, se creía que los sistemas descritos por ecuaciones simples se comportaban simplemente, mientras que los descritos por complicadas ecuaciones lo hacían de modo complejo. En el mundo no-lineal -que, como empezamos a descubrir, incluye la mayor parte del mundo real- simples ecuaciones pueden producir una gran riqueza y variedad de comportamiento. Por otro lado, un comportamiento aparentemente complejo y caótico puede dar lugar a estructuras ordenadas y sutiles patrones.

En los sistemas no-lineales frecuentemente ocurren procesos de retroalimentación amplificadora. Mientras en los sistemas lineales los pequeños cambios producen pequeños efectos, en los sistemas no-lineales los pequeños cambios pueden tener efectos espectaculares, ya que pueden ser repetidamente amplificados por retroalimentación positiva.

Matemáticamente un loop de retroalimentación corresponde a una determinada clase de proceso no-lineal conocido como iteración, en el que una función opera reiteradamente sobre sí misma. Cada uno de los pasos iterativos recibe el nombre de una "cartografía". Una iteración frecuentemente encontrada en sistemas no-lineales y que, aun siendo muy simple, produce gran complejidad, es:

$x \rightarrow kx(1-x)$ en la que la variable x queda reducida a valores entre 0 y 1. Esta cartografía, denominada cartografía logística, tiene muchas aplicaciones importantes. Se usa en biología para describir el crecimiento de una población bajo tendencias opuestas. Una iteración de esta cartografía representada sobre un segmento originará operaciones repetidas de estirado y replegado. A medida que avanza el proceso de iteración los puntos vecinos irán siendo desplazados más y más uno del otro, hasta que resulta imposible predecir en qué posición se encontrará un punto determinado tras múltiples iteraciones. Incluso los ordenadores más potentes redondean sus cálculos al llegar a cierto número de decimales, y después de un número suficiente de iteraciones, incluso el más pequeño error de redondeo habrá añadido suficiente incertidumbre para convertir toda predicción en imposible. La cartografía logística es un prototipo de los procesos no-lineales, altamente complejos e impredecibles, conocidos técnicamente como caos.

TEORIA DEL CAOS

Poincaré introdujo en el campo de las matemáticas una geometría de una nueva especie, conocida como topología. Esta se basa en patrones y relaciones. La topología es una geometría, en la que todas las longitudes, ángulos y áreas pueden ser distorsionados a voluntad, mediante doblado, estirado o retorcido continuos. Todas las figuras que se pueden convertir en otras reciben la calificación de topológicamente equivalentes. Sin embargo, no todo es modificable en estas transformaciones. De hecho, la topología trata de las propiedades de las figuras geométricas que no cambian cuando la figura es transformada (p. ej., intersecciones de líneas, agujeros). Poincaré fue capaz de resolver problemas dinámicos complejos, como el movimiento relativo de tres cuerpos sometidos a sus respectivas atracciones gravitatorias, obteniendo figuras altamente complejas, conocidas cien años después como "atractores extraños" (Stewart, 1989). El enfoque topológico tuvo que esperar al desarrollo de los ordenadores para resolver semejante tipo de ecuaciones complejas, no-lineales. Los ordenadores pueden trazar con facilidad las complejas trayectorias que Poincaré ni siquiera se atrevía a intentar dibujar.

Una ecuación normalmente se resuelve mediante su manipulación hasta conseguir la solución en forma de una fórmula. A esto se llama resolver la ecuación "analíticamente". El resultado es siempre una fórmula. La mayoría de ecuaciones no-lineales que describen procesos naturales son demasiado difíciles para ser resueltas analíticamente, pero pueden ser solucionadas de otro modo, "numéricamente". Esto implica prueba y error. Hay que ir probando distintas combinaciones de números para las variables, hasta dar con las que encajan en la ecuación. El proceso, extremadamente laborioso, cambió con la llegada de los ordenadores. Los equipos y programas informáticos permiten la solución numérica de ecuaciones con gran rapidez. Y así las ecuaciones no-lineales pueden ser resueltas. Pero el resultado no es ya una fórmula, sino una larga lista de los valores que satisfacen la ecuación. El ordenador puede además trazar la solución en forma de curva o conjunto de curvas en un gráfico. La solución gráfica ha permitido resolver ecuaciones no-lineales asociadas con los fenómenos caóticos y así descubrir patrones ordenados tras el aparente caos.

Para develar estos patrones, las variables se presentan en un espacio matemático abstracto llamado "espacio fase" (Prigogine & Stengers, 1984). Cada variable del sistema se asocia con una distinta coordenada de este espacio abstracto. Si se traza la trayectoria de cada variable en un sistema de coordenadas cartesianas se obtiene una curva que forma un loop cerrado. Este loop describe la trayectoria del sistema en espacio fase. Pero este loop no es en absoluto la trayectoria física del objeto, sino una curva en un espacio matemático abstracto, compuesto por las variables del sistema. Cada variable es representada por una coordenada en una dimensión distinta en el espacio fase, de modo que si tenemos 16 variables, tendremos un espacio fase en 16 dimensiones. Un simple punto en este espacio describirá el estado del sistema entero, ya que recogerá las coordenadas correspondientes a cada una de las variables.

Por supuesto, no podemos visualizar un espacio fase de múltiples dimensiones y esta es la razón de que se denomine un espacio matemático abstracto. Los matemáticos no parecen tener mayores problemas con semejantes abstracciones; se sienten muy cómodos en espacios que no pueden ser visualizados. En cualquier momento, mientras el sistema cambia, el punto representativo de su estado en espacio fase se desplazará por dicho espacio describiendo una trayectoria. Distintos estados iniciales del sistema en espacio fase darán origen, en general, a trayectorias distintas.

ATRACTORES EXTRAÑOS

Las trayectorias citadas, cuando se estudian en relación a fenómenos naturales, muestran que por efecto de factores a menudo despreciados (p.ej. el rozamiento), el movimiento irá siendo frenado, hasta detenerse, describiendo en un espacio fase bi-dimensional una curva que se cierra en espiral hacia el centro. Esta trayectoria recibe el nombre de "atractor" porque, metafóricamente, el punto central fijo en el centro del sistema "atrae" la trayectoria. Las trayectorias de loop cerrado reciben el nombre de atractores periódicos, mientras que las trayectorias en espiral hacia adentro se denominan atractores puntuales.

En los últimos veinte años, la técnica del espacio fase ha sido utilizada para explorar una gran variedad de sistemas complejos. Resolviendo numéricamente las ecuaciones no-lineales y haciendo que los ordenadores trazaran las soluciones en espacio fase, los investigadores descubrieron que existe un número muy reducido de diferentes atractores y las propiedades dinámicas generales de un sistema pueden deducirse de la forma de su correspondiente atractor.

Existen tres modelos básicos de atractor: los puntuales, correspondientes a sistemas dirigidos hacia un equilibrio estable; los atractores periódicos, correspondientes a oscilaciones periódicas; y los llamados atractores extraños, correspondientes a sistemas caóticos. Un ejemplo de atractor extraño es el de Ueda et al (1993). Se trata de un circuito electrónico no-lineal que produce un comportamiento complejo: cada oscilación es única, el sistema nunca se repite, y cada ciclo cubre una nueva región de espacio fase. No obstante, los puntos en espacio fase conforman un patrón complejo y altamente organizado. Los patrones que casi se repiten, pero no del todo, son una característica típica de todos los sistemas caóticos. Además, éstos tienen una dimensionalidad muy baja, p.ej., una superficie plegada de 50 dimensiones (50 variables) puede quedar restringida a un atractor extraño de tres dimensiones, lo que significa un muy elevado nivel de orden.

Con la ayuda de los atractores extraños se puede distinguir entre la mera aleatoriedad o "ruido" y el caos. El comportamiento caótico es determinista y pautado, y los atractores extraños permiten transformar los datos en gráficos visibles. Los sistemas caóticos se caracterizan por una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales, haciendo imposible toda predicción a largo plazo. Esto es lo que ocurre p.ej. con las condiciones meteorológicas.

El cambio de énfasis de cantidad a cualidad, que caracteriza al pensamiento sistémico, permite entender las características cualitativas de estos sistemas complejos, aunque desconozcamos sus valores precisos en un momento determinado. El análisis cualitativo muestra que todas las trayectorias iniciadas dentro de una cierta región de espacio fase, desembocarán antes o después en un mismo atractor, por lo que cada atractor tiene una cuenca de atracción. Así, el espacio fase de un sistema no-lineal está compartimentado en varias cuencas, cada una con su correspondiente atractor. El análisis cualitativo consiste en identificar los atractores y cuencas de atracción del sistema, produciendo un gráfico dinámico del sistema llamado su retrato fase.

Estudiando cómo se comportan los sistemas no-lineales al introducir pequeñas alteraciones de sus ecuaciones, se pudo ver que hay dos tipos: en unos casos, aunque se produzcan suaves alteraciones, el retrato fase queda intacto, son los llamados sistemas estructuralmente estables; en otros, pequeños cambios en algunos parámetros pueden producir espectaculares cambios en su retrato fase; los atractores pueden desaparecer o intercambiarse y nuevos atractores pueden aparecer súbitamente; tales sistemas son llamados estructuralmente inestables y los puntos críticos de inestabilidad se denominan puntos de bifurcación, ya que son puntos en la evolución del sistema en que surge un desvío que encamina el sistema en una nueva dirección. Matemáticamente, los puntos de bifurcación marcan cambios súbitos en el retrato fase del sistema. Físicamente corresponden a puntos de inestabilidad en los que el sistema cambia y emergen nuevas formas de orden. Como demostró Prigogine, tales inestabilidades sólo se dan en sistemas abiertos operando lejos del equilibrio.

Y así como el número de tipos diferentes de atractores es reducido, también existen pocos tipos distintos de bifurcaciones, las cuales pueden ser clasificadas topológicamente. Hoy se conocen sólo algo más de 20 tipos de bifurcaciones.

GEOMETRIA FRACTAL

La mayor parte de la naturaleza es muy complicada. Mandelbrot (1983) se preguntaba ¿Cómo describir una nube, un relámpago? Son muy irregulares. Y para describirlos el lenguaje geométrico usual es inadecuado. Así desarrolló una nueva geometría, llamada geometría fractal, que iba a proveer un poderoso lenguaje, idóneo para describir las minuciosas estructuras de los atractores caóticos.

Mandelbrot se dio cuenta de que una gran variedad de fenómenos naturales irregulares compartían algunas características geométricas comunes muy sorprendentes. Para describir y analizar estas características acuñó el término "fractal". La geometría fractal se ocupa de un aspecto de la naturaleza de la que casi todo el mundo era consciente, pero que nadie era capaz de describir en términos matemáticos formales.

La propiedad fundamental de las formas fractales reside en que sus patrones se encuentran repetidamente en escalas descendentes, de modo que sus partes, a cualquier escala, son semejantes en forma al conjunto. Hay muchos ejemplos de esta autosemejanza en la naturaleza, p.ej., en rocas en montañas que se asemejan a pequeñas montañas, ramas de relámpagos, líneas de costa o bordes de nubes que, divididas en partes cada vez menores repiten el mismo patrón. Esta autosemejanza en un borde de nube alcanza hasta 7 órdenes de magnitud, es decir, que tal borde reducido diez millones de veces muestra el mismo patrón. También podemos ver que el trozo de una coliflor, en sí mismo, parece una pequeña coliflor, y dividiendo el trozo repetidas veces sigue pareciendo una diminuta coliflor. Así, cada parte elemental se asemeja al vegetal completo, la forma del todo es semejante a sí misma a

todos los niveles de la escala. Las fotografías del delta de un río, el ramaje de un árbol o las ramificaciones de los vasos sanguíneos pueden evidenciar pautas de tan semejante naturaleza que nos resultará difícil decir cuál es cuál. Esta semejanza de imágenes a escalas distintas permite establecer conexiones entre la geometría fractal y la teoría del caos; así, los atractores extraños son ejemplos exquisitos de fractales. Si se amplían fragmentos de su estructura, revelan una subestructura multinivel en la que los mismos patrones se repiten una y otra vez, hasta el punto que se define comúnmente a los atractores extraños como trayectorias en espacio fase que exhiben geometría fractal.

Otro importante vínculo entre fractales y teoría del caos es el cambio de cantidad a cualidad. Así como en los sistemas caóticos resulta imposible predecir las variables del sistema, pero puede entenderse sus características cualitativas, en geometría fractal es imposible calcular la longitud o área exactas de una figura fractal, pero puede definirse de modo cualitativo su grado de "mellado". Mandelbrot subrayó esta característica de los fractales planteando una provocadora cuestión: ¿Qué longitud exacta tiene la línea de costa británica? Demostró que, puesto que la longitud medida puede extenderse indefinidamente descendiendo de escala, no existe una respuesta definitiva. No obstante, sí es posible definir un número entre 1 y 2 que caracterice el grado de mellado de dicha costa. Para la línea costera británica dicho número es aproximadamente 1,58 mientras que para la noruega, mucho más accidentada, es 1,70. Dicho autor demostró que estos números tienen una dimensión fractal: si consideramos que una línea quebrada sobre un plano llena más espacio que una línea recta, con dimensión 1, pero menos que el plano, con dimensión 2, cuanto más quebrada sea la línea más se acercará su dimensión fractal a 2. De igual modo, una hoja de papel arrugada ocupa más espacio que un plano, pero menos que una esfera; así, cuanto más arrugada sea la superficie, estará más cerca de 3 su dimensión fractal.

Este concepto de dimensión fractal, que al principio era una idea matemática abstracta, se ha convertido en una herramienta para el análisis de la complejidad de las figuras fractales, ya que se corresponde muy bien con nuestra percepción de la naturaleza. Cuanto más sesgados los perfiles del relámpago o los bordes de las nubes, cuanto más abrupto el perfil de costas y montañas, mayor será su dimensión fractal.

PATRONES DENTRO DE PATRONES

Para representar las formas fractales que se dan en la naturaleza, podemos construir figuras geométricas que exhiban autosemejanza precisa. La principal técnica para construir estos fractales matemáticos es la iteración, es decir, la repetición de cierta operación geométrica una y otra vez. El proceso de iteración, la característica común a los atractores extraños, se revela así como la característica matemática central en el vínculo entre la teoría del caos y la geometría fractal.

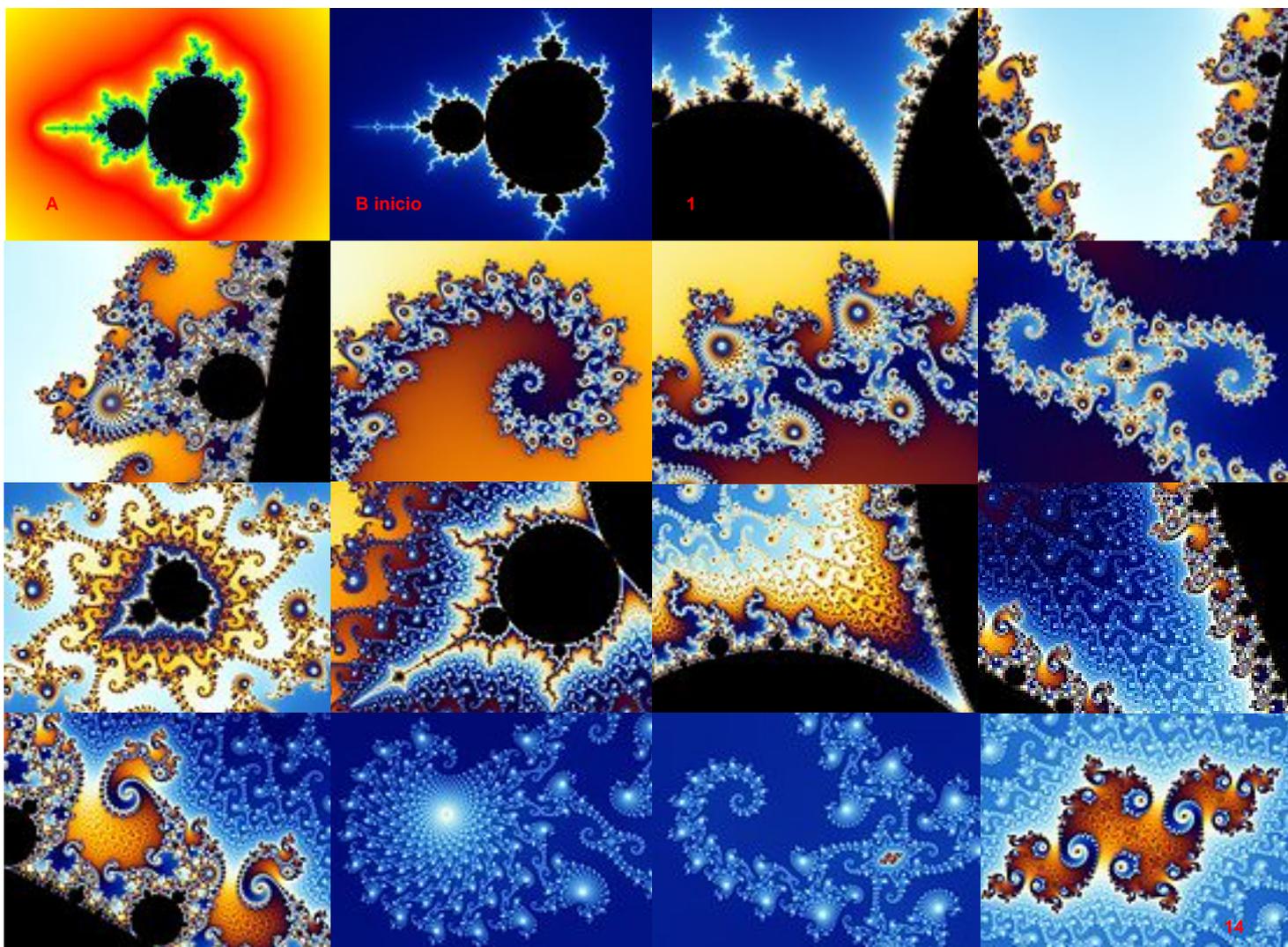
Con la ayuda de ordenadores, iteraciones geométricas simples se pueden reproducir miles de veces a distintas escalas, para producir falsificaciones fractales: modelos generados por ordenador de plantas, árboles, montañas..., con un sorprendente parecido a las formas naturales. Iterando un simple dibujo de líneas a varias escalas, se pueden generar estas imágenes digitales.

La culminación de la geometría fractal ha sido la inclusión de los números complejos, los cuales pueden ser representados en dos planos (real e imaginario). Mandelbrot descubrió que muchas imágenes fractales pueden generarse matemáticamente por procesos iterativos en el plano complejo. Es decir, que incluso estructuras de enorme complejidad matemática, pueden ser generadas con un procesamiento iterativo muy simple. Esto llevó al descubrimiento de un tipo de fractales conocidos como series de Julia y serie de Mandelbrot.

La base de las series de Julia es la sencilla cartografía: $z \rightarrow z^2 + c$ en la que z es una variable compleja y c una constante compleja. El proceso iterativo consiste en tomar cualquier número z en el plano complejo, elevarlo al cuadrado, añadir la constante c , volver a elevar al cuadrado el resultado, añadirle la constante c y así sucesivamente. Cuando esto se hace con distintos valores iniciales de z , algunos de ellos irán aumentando hacia el infinito a medida que avanza la iteración, mientras que otros se mantendrán finitos. Las series de Julia son el conjunto de valores de z que permanecen finitos bajo iteración (Gleick, 1987). Su representación gráfica puede hacerse con un ordenador de alta velocidad, y hay un número infinito de éstas según los valores que asignemos a c . Las imágenes resultantes pueden ser únicas y conexas, estar fragmentadas en partes inconexas, o parecer motas de polvo. Todas comparten el aspecto dentado característico de los fractales y la mayoría resulta imposible de describir en lenguaje de la geometría clásica. Algunas parecen nubes, otras se asemejan a zarzas, a chispas de fuegos artificiales, alguna recuerda a un conejo, muchas tienen colas de hipocampo. Esa rica variedad de aspectos, muchos de los cuales recuerdan formas vivas, es de por sí sorprendente, pero lo más sorprendente -casi mágico- comienza cuando ampliamos el contorno de cualquiera de sus partes. Como en el caso de la nube o la línea de costa, la misma riqueza aparece en todas las escalas. Con resolución creciente, aparecen más y más detalles, revelando una fantástica secuencia de patrones dentro de patrones, todos ellos similares sin ser idénticos.

La serie de Mandelbrot es aún más compleja, ya que es una colección de todos los puntos de la constante c en el plano complejo para series de Julia conexas. Es una figura única, el objeto matemático más complejo jamás inventado. Se ha generado en vídeo un recorrido por la serie de Mandelbrot que su sola contemplación es una experiencia inolvidable: a medida que la cámara se aproxima con el zoom y amplía el borde, parecen surgir del mismo, brotes y zarcillos que, ampliados a su vez, se disuelven en una multitud de formas, espirales dentro de espirales, hipocampos y remolinos, formas orgánicas bullendo y explotando en polvo, repitiendo una y otra vez los mismos patrones (Peitgen et al, 1990). En cada escala, que los ordenadores actuales pueden ampliar hasta cien millones de veces, la imagen recuerda a formas orgánicas en su inacabable complejidad, incluyendo una diminuta réplica de toda la serie de Mandelbrot y un número infinito de series de Julia, sumergidas en las profundidades de sus bordes.

Figura 5. Un viaje a través de la **Serie de Mandelbrot** (A) mediante una secuencia de zooms (con falso color) (B = inicio; le siguen 14 fases de zoom). La serie de Mandelbrot muestra detalles cada vez más intrincados, a medida que se magnifica la imagen (a medida que se hace zoom sobre ella). La siguiente secuencia, para un valor seleccionado de c , da una impresión de la infinita riqueza de diferentes estructuras geométricas. La magnificación de la última imagen con respecto a la primera es de 10 mil millones a 1. En relación al tamaño de un ordenador, esto representa una sección con un diámetro de 4 millones de kilómetros. Sus bordes muestran un número inconcebible de diferentes estructuras fractales.



Serie de Mandelbrot con color continuo. (B = fase cero = inicio).

- (1) Brecha entre la "cabeza" y el "cuerpo", también llamada "valle de los hipocampos".
- (2) Sobre el lado izquierdo espirales-dobles, sobre el derecho hipocampos.
- (3) El cuerpo de cada hipocampo está compuesto de 25 "ruedas" consistente en 2 grupos de 12 "ruedas" con cada rueda conectada al cardioide principal; el número de "ruedas" se incrementa de un hipocampo al próximo por 2; el punto central de la rueda es llamado punto de Misiurewicz; entre la parte superior del cuerpo y la cola puede reconocerse una pequeña copia distorsionada del llamado "satélite" de la serie de Mandelbrot.
- (4) El centro del punto final de la cola del hipocampo es también un punto de Misiurewicz.
- (5) Parte de la "cola"; posee una sola vía de delgadas estructuras que conduce a través de toda la cola; esta vía en zigzag pasa a lo largo de objetos con 25 discos en los bordes interno y externo de la cola; ello asegura que la serie de Mandelbrot es una serie simplemente-conectada, lo que significa que no hay islas ni loops alrededor de agujeros.
- (6) Satélite. Las dos colas de hipocampo están al comienzo de una serie de coronas concéntricas con el satélite en el centro.
- (7) Cada una de estas coronas consiste en similares colas de hipocampos; su número se incrementa con potencias de 2, un fenómeno típico en el ambiente de los satélites.
- (8) Antena del satélite. Puede reconocerse varios satélites de segundo orden.
- (9) Valle de los hipocampos del satélite. Reaparecen todas las imágenes de la fase del zoom 1.
- (10) Dobles-espirales e hipocampos. A diferencia de la fase de zoom 2, estos tienen 2 apéndices consistentes en estructuras parecidas a "colas de hipocampos"; esto demuestra la unión típica de $n+1$ estructuras diferentes en el ambiente de los satélites de orden n , aquí para el más simple caso $n=1$.
- (11) Dobles-espirales con satélites de segundo orden; en forma análoga a los "hipocampos", las dobles-espirales pueden ser interpretadas como una metamorfosis de las "antenas".
- (12) En la parte externa de los apéndices pueden reconocerse islas de estructuras; ellas tienen la forma de series de Julia J_c ; la más grande de ellas puede ser hallada en el centro de un "doble-gancho" sobre el lado derecho.
- (13) Parte de un "doble-gancho".
- (14) A primera vista estas islas parecen consistir de infinitas partes parecidas a series de Cantor. Aquí ellas están conectadas por delgadas estructuras; éstas se ensamblan una a otra a través de un satélite en el centro que es demasiado pequeño para ser reconocido con esta magnificación.

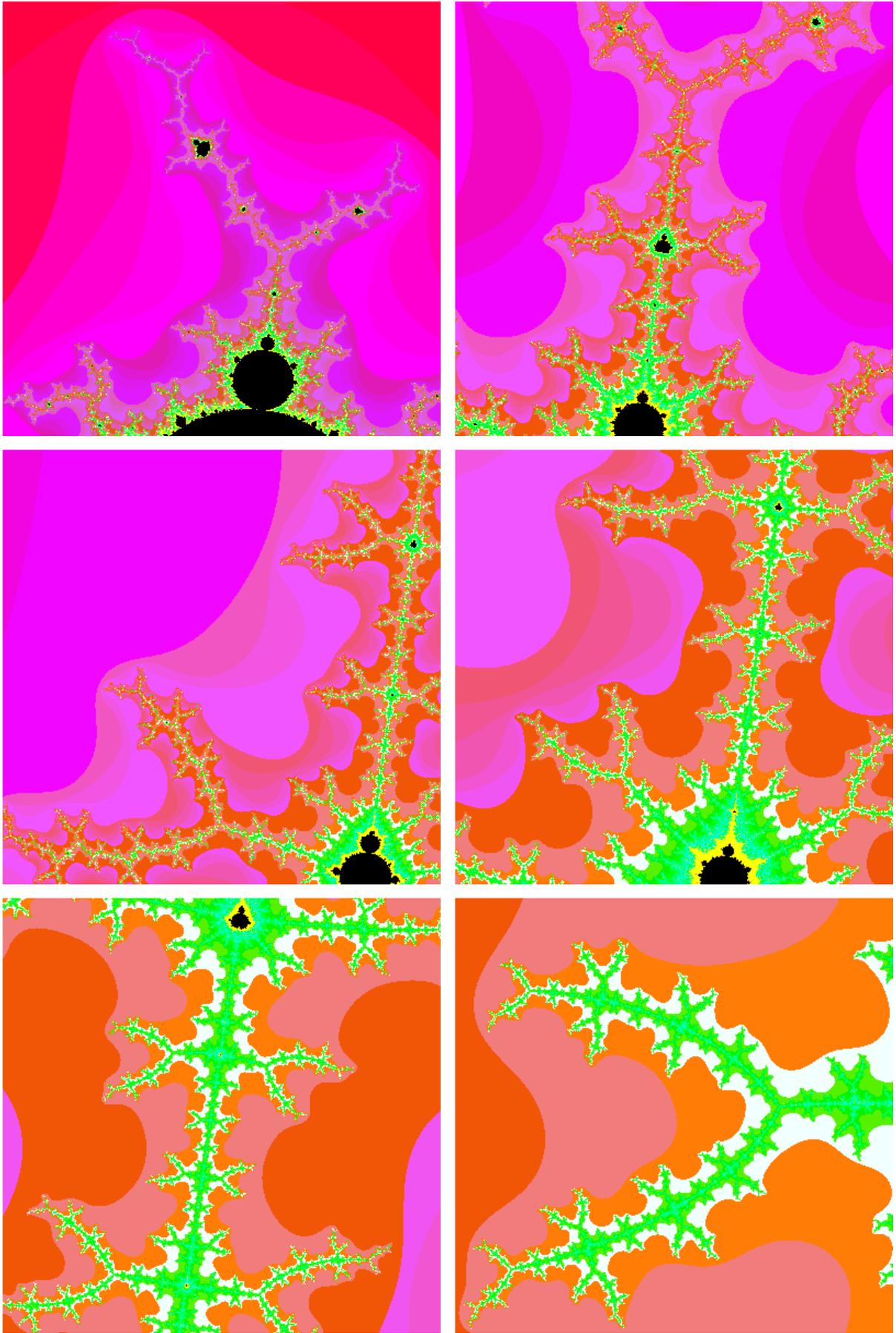


Figura 6. Otra representación artística con falso color de un borde de la Serie de Mandelbrot.
Cada paso de zoom magnifica la imagen anterior.

No obstante, esta estructura "superfractal", cuya riqueza desafiaba a la imaginación humana, está generada por unas pocas reglas muy simples. La geometría fractal ha obligado a científicos y matemáticos a revisar el concepto mismo de complejidad. En las nuevas matemáticas de la complejidad, las ecuaciones sencillas pueden generar atractores extraños enormemente complejos y reglas sencillas de iteración dan lugar a estructuras más complejas de lo que podríamos imaginar jamás. Como Mandelbrot señala: el sentido inicial era encontrar reglas sencillas para entender el universo que nos rodea, explicaciones simples para realidades complejas. Pero la discrepancia entre simplicidad y complejidad nunca fue comparable con lo que nos hemos encontrado.

La fascinación ejercida por la teoría de sistemas complejos y la geometría fractal, en personas de todas las disciplinas -desde científicos a artistas-, hace que cada vez más muchas personas se den cuenta del reduccionismo de las ideas mecanicistas, y de la importancia de la comprensión de los patrones para entender el mundo que nos rodea.

SEGUNDA PARTE

PATRONES DE JAIZKIBEL

Esta general disertación (que tratamos de comprimir al máximo) de algún modo era necesaria para aportar una visión sistémica sobre lo que a continuación vamos a tratar: los patrones reales encontrados en cuevas y geoformas del pseudokarst de Jaizkibel, y su posible interpretación. En un trabajo previo (Galán & Nieto, 2010) expusimos curiosos ejemplos de boxworks, bandas de Moebius, anillos de Liesegang, y otras extravagantes geoformas que, particularmente, llaman la atención por sus diseños y coloridos, con frecuencia de gran belleza estética y considerable complejidad. Adelantamos también la sugerencia de que muchos de los patrones de celdas poligonales y bandas de coloración eran análogos a patrones formados por reactividad química, difusión y convección en otros medios, tanto experimentales como naturales, exponiendo una revisión de los patrones Bénard-Marangoni, Turing, Simoyi, biomorfos, y otros. Varios aspectos han llamado al respecto nuestra atención.

En primer lugar, cabe destacar que en el karst clásico no se encuentran geoformas comparables, ni tampoco en el karst en cuarcita. En la inmensa mayoría de las cuevas las galerías tienen perfiles y secciones con superficies determinadas por rasgos estructurales o por la acción disolvente del agua. También son comunes las espeleotemas, formadas por la precipitación de los minerales disueltos. En la morfología kárstica de superficie se encuentran a su vez relieves espectaculares, como p.ej., los tepuys (Venezuela), los karsts en mogotes o pináculos en zonas tropicales (Cuba, Nueva Guinea) y los tsingys o megalapiaces (Madagascar). Algunas formas como scallops o morfologías freáticas pueden a veces destacar. Pero en las cavidades de Jaizkibel, la disolución de la roca (arenisca carbonática) ha creado formas inusuales, en redes poligonales de celdas, y curiosos diseños en bandas concéntricas e irregulares. Tales geoformas no son espeleotemas ni tampoco rasgos litológicos de la roca-caja. En cortes frescos de la roca no se encuentran tales patrones, sino que son formados por procesos de disolución y precipitación, en el interior de la red de vacíos del pseudokarst.

A diferencia del karst clásico en caliza y otras rocas solubles, en las que la disolución progresa a través de diaclasas y planos de estratificación, lo peculiar del pseudokarst en arenisca es que la disolución actúa sobre todo intergranularmente, avanzando a través de los límites entre los cristales de cuarzo, y disolviendo a su paso el cemento carbonático. Con lo cual la arenisca, inicialmente compacta, adquiere una porosidad secundaria muy ampliada, pierde buena parte de su cementación y se transforma progresivamente en una roca incoherente, frágil y disgregable. Este proceso de disolución intergranular ha sido llamado "arenización" (Urbani, 1986; Galán, 1991; Galán & Lagarde, 1988) y afecta fundamentalmente al cemento. El hecho de que sea éste el proceso predominante en la arenisca, es lo que determina, en nuestra opinión, que tales geoformas no se encuentren en el karst clásico. Por la misma razón es raro que se formen cuevas en arenisca. Mientras que en Jaizkibel se forman cuevas y en ellas las geoformas están ampliamente extendidas, constituyendo uno de sus rasgos principales.

La red intergranular de vacíos en el pseudokarst de arenisca se desarrolla y amplía progresivamente, formando un acuífero intergranular. A través del sistema circulan las aguas subterráneas. Por lo tanto, se trata de un sistema abierto, dinámico, en el que la propia circulación subterránea determina el progreso de la disolución y ampliación de la red de microcavidades.

Las geoformas en patrones de celdas poligonales no se encuentran en superficie ni en el más compacto interior de la roca, sino que se generan y amplían sobre las paredes y bóvedas de grutas y cuevas ya formadas en la arenisca, o incluso son precisamente éstas las que contribuyen a la formación de las cuevas. En todo caso, tales geoformas ocupan una posición espacial en el acuífero, que, podríamos decir, corresponde al tramo más superficial de las paredes en el interior de las cuevas.

Las geoformas en sí comprenden celdas más o menos profundas separadas por tabiques relativamente muy delgados en comparación con las celdas. P.ej. son frecuentes tabiques de 5 mm de espesor separando celdas de 10-20 cm de diámetro y otro tanto de profundidad. En los grandes boxworks hay ejemplos extremos de celdas de 50 cm de ancho y cerca de 1 m de profundidad, las cuales están separadas por tabiques resistentes de espesores milimétricos, soportados por silicificaciones locales.

Para que la roca arenizada sea evacuada generando celdas, es necesario que la disolución y remoción de los granos progrese a partir de una red formada previamente por precipitación, recementación y/o no-disolución de parte del cemento que une los granos, y es a partir de tales patrones que se originan los boxworks. Así, ocurre primero una formación de patrones de roca recementada o no disuelta, a partir de los cuales se generan los patrones subsiguientes de geoformas. Es decir, existe un prepatrón, del cual el patrón último de las estructuras es una resultante. Veremos esto con más detalle a continuación.

DISOLUCION - PRECIPITACION

La formación de cavidades en Jaizkibel ocurre básicamente por meteorización química: conjunto de procesos que disuelven, alteran y disgregan la roca, tornándola friable e incoherente, y facilitando la erosión y transporte posterior de los granos de cuarzo o fragmentos poco solubles de otros minerales. Actúa mayoritariamente sobre la matriz o cemento carbonático y en menor proporción sobre los granos silíceos. Varios procesos intervienen:

(a) Disolución del cemento carbonático: La disolución de la matriz carbonática procede químicamente como en la caliza, por acción de las aguas meteóricas cargadas de CO_2 y ácidos del suelo. Pero además de actuar a través o a partir de discontinuidades de la roca (diacclasas y planos de estratificación), puede progresar intergranularmente. De este modo es disuelto el cemento.

(b) Disolución parcial de los granos de cuarzo: También puede ser disuelto cierto porcentaje de sílice. Aunque la solubilidad de la sílice es muy baja, lo interesante (como ha sido demostrado para el karst en cuarcita) es que su tasa de disolución es muy baja. Cuando el agua circula intergranularmente esta circulación es muy lenta debido a su viscosidad, y el agua puede permanecer subsaturada con respecto a la sustancia sobre cierta distancia sólo si la tasa de disolución es baja. Este es el caso para el cuarzo, pero no para la calcita, que es mucho más soluble (Martini, 1982). De este modo el cuarzo puede ser disuelto y evacuado en cierto porcentaje, sobre todo en las fases iniciales, de más lenta circulación.

(c) Alteración de otros minerales: Los feldespatos y micas, incluidos en la arenisca en cantidades minoritarias, están expuestos a una alteración relativamente rápida, produciendo minerales de la arcilla. Estas fracciones finas son removidas con facilidad. Aunque se trata de un pequeño porcentaje (probablemente en torno al 2%), en relación al volumen de granos de cuarzo (que alcanza por sí sólo entre 80 y 96%), la alteración de otros minerales contribuye también a la meteorización de la roca.

(d) Procesos bioquímicos: Los suelos, vegetación, algas y líquenes que cubren a la arenisca, influyen también en la alteración de los minerales y aceleran los procesos de meteorización de la roca al prolongar la presencia de agua, por el efecto físico de desintegración debido a las raíces y, sobretodo, al producir por actividad bacteriana ácidos orgánicos reactivos.

En muestras analizadas por vía húmeda, tras eliminar el carbonato cálcico por disolución en ácido clorhídrico, la comparación entre la arenisca normal y la arenisca alterada con precipitados de otras sustancias, demuestra que, respectivamente: (1) El contenido en SiO_2 desciende de 89,02 en la roca fresca a 59,72% en la roca alterada. (2) El contenido de Al_2O_3 aumenta de 2,93 a 10,66%. (3) El contenido en Fe_2O_3 aumenta de 1,35 a 21,47%. (4) Los contenidos en Ca y Mg permanecen casi iguales. (5) Se detecta un leve incremento de las fracciones arcillosas en la roca alterada (Galán et al, 2007). Ello demuestra que la disolución intergranular de la arenisca puede disolver el cemento carbonático, parte de la sílice de los granos de cuarzo, y gran parte de los feldespatos y micas contenidos en la arenisca en cantidades minoritarias. Los elementos disueltos pasan a las aguas.

En conjunto, las aguas que ingresan al acuífero intergranular son agresivas y en su tránsito reaccionan con los minerales presentes disolviendo la roca y cargándose de sustancias en solución. Las aguas en el interior del acuífero constituyen por lo tanto soluciones multicomponentes. Si alcanzan la sobresaturación, en momentos o partes distintas del acuífero, pueden precipitar y generar tanto cementaciones secundarias de sílice y/o carbonatos como concreciones y láminas de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio.

GENESIS DE CUEVAS Y GEOFORMAS

Nuestro caso se asemeja en varios aspectos al karst en cuarcita de países como Venezuela, Brasil o Sudáfrica (Urbani, 1981, 1986; Galán & Lagarde, 1988; Galán & Herrera, 2005, 2006). Tanto las areniscas de la Formación Jaizkibel como las cuarcitas del Grupo Roraima están compuestas mayoritariamente (más del 80% hasta el 96%) por granos de cuarzo, residiendo la principal diferencia en que la matriz o cemento intergranular es carbonático en el primer caso y silíceo en el segundo. El proceso primario de disolución puede verse facilitado en las areniscas, ya que el cemento carbonático es más soluble que el silíceo; no obstante, la remoción del material por disolución está restringida en ambos casos al 10-20% del volumen de roca; lo cual contrasta claramente con el karst clásico en caliza, donde la disolución generalmente afecta al 80% o más del volumen de roca.

Debido a que la disolución y meteorización de la roca también actúa en superficie, para que se formen cavidades es necesario que en el interior de la roca la arenización progrese más rápidamente que en superficie. De otro modo la roca sería rebajada y reducida a arena, sin formar cavidades. La fracturación facilita la penetración del agua y, a partir de estas vías iniciales, la infiltración progresa intergranularmente, disolviendo a su paso el cemento. Las observaciones de campo muestran que la localización de cavidades ocurre en general en las partes laterales externas e inferiores de estratos individuales y grandes bloques, es decir, en los puntos naturales de más fácil salida del agua intergranular. Estas zonas, de surgencia a pequeña escala, permiten evacuar los minerales disueltos, aumentan la red de vacíos en el volumen de roca, y evolucionan hasta formas cavidades y geoformas en su interior.

Las cavidades se localizan en zonas de borde de escarpes verticales, donde la densidad de fracturas es mayor. A partir de estas zonas, de amplificada fracturación, la disolución puede extenderse hacia abajo y lateralmente hasta intersectar un vacío externo, a una cota inferior. De este modo, al establecerse un sistema de drenaje del agua intergranular, los minerales disueltos pueden ser evacuados, ampliando progresivamente la red de vacíos y descohesionando la roca antes compacta, hasta dejar los granos de cuarzo casi sueltos. Este parece ser el proceso primario.

Si ahora consideramos la presencia de geoformas (boxworks, formas alveolares, etc.) resulta claro que el volumen rocoso no se comporta de modo homogéneo. Nosotros hemos propuesto un modelo teórico general para explicar la formación simultánea de



Figura 7. Cavidades y geofomas en el pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel. Nótese la diversidad de colores de la arenisca, la presencia de cannonballs y concavidades, y los patrones hexagonales y poligonales de boxworks de gran tamaño.



Figura 8. Boxworks, estructuras de corriente y bandeados de oxi-hidróxidos de hierro, en las cuevas de Jaizkibel. Nótese la similitud con diseños fractales.

cavidades y geoformas en su interior (Galán et al, 2007, 2009). Este modelo básicamente postula que la formación de cavidades, alveolos y celdas es un proceso de alteración diferencial, debido a la alternancia de fases de humectación con otras de desecación.

La alteración procede por disolución intergranular: durante las fases húmedas o lluviosas el agua penetra cierta distancia a través de la porosidad de la roca y disuelve a su paso parte de la matriz o cemento carbonático; durante las fases secas, el agua se evapora de la roca, y parte del carbonato disuelto es conducido hacia la superficie, donde forma una dura y compacta zona externa. El proceso de evaporación causa que el carbonato remanente en el interior de la roca se distribuya desigualmente, dando lugar a áreas blandas y duras, con bajo y alto contenido en carbonato, respectivamente. De igual modo, la sílice y los óxidos de hierro y aluminio en solución pueden precipitar en redes, mallas y láminas, que resultan así recementadas por sílice secundaria (como en los boxworks) o difunden hacia la arenisca adyacente generando precipitados rítmicos de minerales de hierro (como en los anillos de Liesegang). Una vez constituidas estas zonas de desigual resistencia o desigual cementación, las partes suaves del interior se erosionarán más fácilmente que las duras, formando cavidades y geoformas alveolares. Las delicadas estructuras en “panal de abejas” y “box-works”, resultan de las diferentes tasas de erosión de las áreas duras y blandas en el interior de la arenisca (Galán et al, 2009).

Diversos autores (Mainguet, 1972; Martini, 1978; Mustoe, 1982; Twidale, 1982) han sugerido una evolución en varias fases. Ocurre primero una fase isotrópica de crecimiento de una cavidad, después otra fase, anisótropa, donde la desagregación progresa en pequeños dominios, dando lugar a la formación de alveolos o formas coalescentes. La fase siguiente corresponde a la paralización de la desagregación debida a una alteración de las condiciones ambientales de la cavidad, en general por la abertura de ventanas, la ruptura de paredes laterales y la ampliación del conducto, a veces seguida de la destrucción de los tabiques que forman los alveolos. En una última fase se puede incluso producir la destrucción de la cavidad y geoformas por pérdida de resistencia del bloque meteorizado.

El modelo teórico expuesto proporciona una explicación general. Pero no deja claro otros detalles, como: qué causa que a una fase isotrópica sigue otra anisótropa; tampoco resulta claro el grado de penetración intergranular de las soluciones, o el modo en que se forman patrones de material recementado o no-disuelto. Algunas hipótesis explicativas fueron avanzadas en Galán & Nieto (2010). Desde luego, el volumen pseudocristificado no sólo resulta inhomogéneo, sino que evidencia la creación de patrones internos (que inicialmente no existían). Así que existen o deben intervenir factores dinámicos, asociados al flujo y reactividad de las soluciones en el interior del sistema.

En el caso de boxworks, la presencia de una malla dura, con patrones hexagonales o poligonales, corresponde a silicificaciones que no existían previamente en la roca, y que han sido formados durante la evolución del sistema al alcanzarse puntos críticos de inestabilidad (puntos de bifurcación), de los cuales emergen nuevas formas de orden, en patrones de precipitación. El progreso subsiguiente de la disolución intergranular es lo que genera las geoformas en grandes celdas. Y como hemos visto previamente, tales inestabilidades solo se dan en sistemas disipativos abiertos, operando lejos del equilibrio.

DIFUSION Y CONVECCION MULTICOMPONENTE

La formación de patrones es así un mecanismo que opera en un momento determinado en la evolución dinámica del sistema. Y que no es explicado por la mera disolución intergranular, sino que involucra fenómenos de difusión y convección multicomponente.

La formación de patrones por reactividad química, difusión y convección, es frecuente en la naturaleza. Una amplia variedad de sistemas fuera del equilibrio exhiben patrones en celdas con simetría hexagonal o poligonal. En sistemas químicos en solución se producen reacciones que generan ondas, las cuales se propagan a través del medio por el acoplamiento de difusión a la reacción química. Turing (1952) fue el primero en proponer un modelo en el cual el acoplamiento de la difusión con la cinética química no-lineal es suficiente para producir soluciones estacionarias, las cuales conducen a inhomogeneidad espacio-temporal. En dicho modelo el ambiente cinético no-lineal puede ser generado por autocatálisis, por autoinhibición, y por condiciones de flujo. Se pueden generar también gradientes de concentración que alteran la densidad de las soluciones, ocasionando convección (Simoyi, 1991; Nagy & Pojman, 1993; Semwogerere & Schaltz, 2001). Al hablar de estructuras disipativas hemos citado el clásico ejemplo de los patrones de convección de Bénard y los patrones de rizos y bandas paralelas de Belousov. Otros ejemplos de patrones de difusión y convección por reactividad química han sido expuestos en un trabajo previo (Galán & Nieto, 2010), incluyendo ejemplos en medio poroso y convección multicomponente.

En la cinética de las reacciones que tienen lugar en el acuífero intergranular en la arenisca de Jaizkibel, las sustancias que reaccionan en primer lugar pueden generar ondas que inducen (según su tasa de difusión, concentración de las sustancias, y forma y tamaño de campo) la precipitación rítmica y cementación en patrones diversos. Semwogerere & Schaltz (2001) han mostrado que los patrones hexagonales pueden contener múltiples diseños y que puede suscitarse competencia entre patrones distintos, donde cada diseño posee una diferente longitud de escala característica. Otros trabajos muestran que los hexágonos pueden también evolucionar lentamente hacia patrones desordenados o presentar distintos comportamientos de deformación (Cerisier et al, 2007; Colinet et al, 2002; Young & Riecke, 2002). Cuando el campo no es uniforme o incluye perturbaciones topográficas, se puede generar una gran variedad de patrones (hexagonales, cuadrados, triangulares) y cambios de escala en el tamaño de celdas. Dependiendo de las mezclas de fluidos, una convección incluso débil puede ocasionar comportamientos diferentes según el número de componentes involucrados. Así, las mezclas ternarias exhiben mayor diversidad y complejidad que las binarias, debido a difusión molecular cruzada y flujos dependientes de otras variables, tales como gradientes de densidad, gravitacionales y térmicos.

En la arenisca de Jaizkibel, además de los componentes mayoritarios (granos de cuarzo y cemento carbonático) existen muchos otros minoritarios. En análisis de muestras efectuados en relación al estudio de paramoudras mediante técnicas de microscopía y espectroscopía de transmisión de alta resolución (especialmente espectroscopía Raman), han sido hallados, entre otros, los siguientes minerales: sílice autigénico, calcita, aragonito, anhidrita, aluminita, anatasa, glauconita, magnetita, siderita, silicatos de magnesio y de aluminio (fonolita), sulfuros y sulfatos, óxidos de hierro, restos de fragmentos biológicos de foraminíferos y de moluscos (Galán & Vera Martín, 2009; Galán & Oyarzabal, 2009; Galán et al, 2009, 2010). La microfotografía muestra distribuciones heterogéneas, a veces organizadas en torno a cuerpos crecionales formados durante la diagénesis, tal como en paramoudras y cannonballs. En adición, las aguas meteóricas que ingresan al sistema pueden contener diversas concentraciones de CO₂, ácidos orgánicos producto de la actividad bacteriana y ácidos húmicos, los cuales pueden rebajar sustancialmente el pH y otorgar mayor acidez y agresividad a las aguas, transformándolas en soluciones reactivas, que interactúan a su paso por el acuífero con los componentes minerales de la arenisca.

En consecuencia, se trata de soluciones que involucran una considerable cantidad de componentes, en su química y mineralogía. Es de suponer que durante los procesos de disolución de la roca (y precipitación) se producirán diversas reacciones, en una compleja concatenación de eventos, de la cual desconocemos sus detalles. Pero sí resulta más o menos evidente que la disolución ha trabajado sobre sistemas sílice-carbonato, hierro-carbonato, y otros sistemas complejos. Esto, de por sí, constituye una diferencia con el karst clásico y el karst en cuarcita, que introduce posibilidades de reactividad química mayores y posibilidades de reactividad que involucran fenómenos de difusión y convección multicomponente.

La formación de patrones en celdas hexagonales o poligonales, y bandeados paralelos y concéntricos, sugieren la ocurrencia de fenómenos análogos a los que se producen por difusión y convección en los modelos de Turing y Bénard-Marangoni, con el resultado de precipitación y cementación en patrones diversos (Simoyí, 1999; Galán & Nieto, 2010). Muy probablemente su detonante proceda del acoplamiento entre la precipitación de sílice y la de carbonatos.

Tales acoplamientos, como se ha demostrado bajo condiciones experimentales con sistemas sílice-carbonatos en biomorfos (Van Den Berg, 2009), pueden conducir a la ruptura de los cristales iniciales en millones de nanocristales, que se autoorganizan en láminas o inician mecanismos de rizo, que pueden dar lugar a formas de curvatura continua y patrones diversos.

Nuestras observaciones sugieren que los patrones de celdas de los boxworks se generan en un momento determinado (situación de inestabilidad) y no en todo el volumen sino en el tramo del acuífero intergranular más próximo a la superficie de las paredes y bóvedas internas de las cuevas, superficies éstas con determinados grados de curvatura y tamaño de campo.

El paso de una fase isótropa de crecimiento de la cavidad, a otra fase anisótropa de formación de patrones en pequeños dominios, no ocurre por arte de magia, sino que es el resultado de un proceso de autoorganización, por mecanismos disipativos que actúan en un momento determinado de la evolución de un sistema abierto, lejos del equilibrio. Su posterior desarrollo conduce a la formación de geoformas alveolares y boxworks. La desigual cementación de la roca no viene así dada de antemano, sino que es debida a ondas de actividad química, de cuyo comportamiento coherente emergen de modo espontáneo celdas y vórtices de circulación que generan los patrones hallados, y que han dejado su impronta en la roca como macroformas.

Los extravagantes diseños presentes en las geoformas de las cuevas de Jaizkibel sugieren en consecuencia la ocurrencia de diversos procesos, ocasionados por reactividad química, difusión y convección multicomponente en sistemas sílice-carbonato, los cuales entrañan la creación de patrones inusuales. Algo desconocido para el karst clásico y el karst en cuarcita.

EL LOOP DE JAIZKIBEL

La karstificación de la arenisca, aunque comparativamente es poco profunda y origina cuevas de desarrollo modesto, presenta en cambio una inusual multiplicidad y diversidad de geoformas (Galán et al, 2009; Galán & Nieto, 2010).

Desde un punto de vista sistémico, la pseudokarstificación es sólo una parte en un amplio ciclo de procesos, que involucra repetidas interacciones entre fuerzas geológicas, organismos vivos, atmósfera y océanos. Observando el medio con los ojos de un naturalista, enseguida surge la percepción de la gran riqueza de procesos que han tomado parte en propiciar las curiosas geoformas que de modo sorprendente hoy nos muestra el pseudokarst de Jaizkibel. Seguramente investigadores como Humboldt, Margalef, o Lovelock, intuirían rápidamente esta historia de interacciones entre la evolución orgánica y el mundo inorgánico, donde los procesos de autoorganización han estado repetidamente presentes. El pseudokarst de Jaizkibel constituye así, en nuestra opinión, no un estrecho marco de detalles geológicos, sino un inusual y fértil campo de estudio, el cual induce a reflexiones sobre multiplicidad de aspectos -habitualmente asignados a disciplinas científicas separadas- pero que involucran interesantes e ilustrativas interacciones a lo largo de lo que llamamos el loop de Jaizkibel, y que nos remiten a un conjunto de procesos evolutivos, de gran interés didáctico y formativo.

Así, en primer lugar, la presencia de areniscas Eocenas nos remonta a un lejano pasado. Las arenas de Jaizkibel proceden de un ciclo erosivo que rebajó antiguos macizos Paleozoicos, cuando la configuración de los continentes era otra, distinta a la actual. Las arenas fueron depositadas en una plataforma continental formada durante el Mesozoico sobre la placa continental Europea. Según Van Vliet (1982) y Rosell (1988) la cuenca Eocena pirenaica corresponde a un surco E-W, donde las facies distales (profundas) se sitúan en la parte occidental (País Vasco). La subcuenca Eocena del País Vasco, situada al W de la Falla de Pamplona o de Bigorre, presenta buenos afloramientos solo a lo largo de la línea de costa, y por ello es la peor conocida en la literatura geológica. Se desconoce donde se hallaban situadas las plataformas, cuya destrucción y resedimentación originaría las turbiditas Eocenas del Arco Vasco. Por tratarse del sector de cuenca más abierto al océano, es probable que estas plataformas se hayan destruido por completo, lo cual al mismo

tiempo explica el considerable desarrollo de sus sistemas turbidíticos, los cuales alcanzan 1.500 m de espesor preservado. Las reconstrucciones paleogeográficas sugieren que la región formaba parte del margen meridional de un macizo Europeo (Plateau de Las Landas), lo que explica la semejanza en la evolución sedimentaria entre ésta y la zona Norpirenaica (Robles et al, 1988).

Durante la apertura del Atlántico Norte este tramo alcanzó profundidades abisales (4.000 m). Kruit et al (1972) señalan que las descargas detríticas procedían del Norte y se produjeron en la desembocadura de cañones submarinos; los materiales arenosos van a formar conos de deyección submarinos, con disposición en abanico, en los que las descargas coexistían con aportes turbidíticos axiales alimentados desde el Este; éstos aportes, menos masivos, serían absorbidos y reordenados suturándose lateralmente con las masas de arenas. Campos (1979) distinguió en el área de estudio dos grandes conos de deyección submarino, uno oriental (sector del monte Jaizkibel), que comenzaría a formarse al final del Paleoceno superior y continuaría recibiendo aportes durante todo el Eoceno inferior, y otro, occidental (entre San Sebastián y Orio), cuya base se situaría en el Eoceno inferior y se extendería hasta el Eoceno medio. Para Rosell (1988) la entera secuencia de areniscas es de edad Eoceno medio.

La colisión y soldadura de la placa Europea con la placa semi-independiente de Iberia eleva los terrenos a partir del Eoceno medio formando la cadena de los Pirineos. Los movimientos tectónicos y la erosión subsecuente de las zonas emergidas llevan a la configuración del relieve actual. El flysch costero Eoceno es precisamente el último terreno geológico formado antes de la emersión del territorio vasco de las aguas. Los rasgos físicos de la costa de San Sebastián y sus alrededores se deben así a la disposición de estas capas del flysch Eoceno, recortadas por la erosión de los ríos que desaguan al Cantábrico.

Dentro de la secuencia del flysch, el pseudokarst de Jaizkibel adquiere su mayor desarrollo en los estratos de mayor espesor y más compactos, formados por arenas de grano medio a grueso, los cuales debían ocupar las partes medias de importantes canales distribuidores de los abanicos de deyección submarinos (Jérez et al, 1971; Campos, 1979).

Es sabido que las arenas son generalmente los sedimentos menos alterados por diagénesis y particularmente por compactación. La mayor modificación durante la diagénesis o transformación del sedimento en roca, suele ser el resultado de procesos de cementación o eventualmente recristalización; mientras que los efectos de compactación y metasomatismo son poco importantes, por lo general, en las areniscas (Petzall, 1967; Cocks & Parker, 1981). La cementación transforma el sedimento en roca litificada, por formación de minerales en los intersticios del sedimento y cementación de los granos entre sí, lo que a su vez otorga rigidez al sedimento transformado en roca y disminuye su permeabilidad y porosidad. La recristalización ocurre comúnmente por disolución parcial y reprecipitación del material disuelto. En la arenisca de Jaizkibel el cemento carbonático procede en buena parte de restos de organismos vivos de la lluvia de plancton que alcanza las profundidades abisales y de los organismos del bentos que vivían entonces allí.

Así, la arenisca que hoy vemos ha sido formada a través de un largo proceso, por sucesivas interacciones que incluyen: meteorización de los macizos Paleozoicos por los agentes atmosféricos, en cuya erosión incide también la vegetación y suelos entonces existentes; procesos de transporte y depósito en una plataforma continental Europea; proceso de rifting durante la apertura del Golfo de Bizkaia y formación de la cuenca Eocena; resedimentación de las arenas por corrientes de turbidez y emplazamiento de estas a profundidades abisales; diagénesis de la arenisca con formación de cementos carbonatados debidos a organismos; generación de estructuras de corriente en las turbiditas durante su emplazamiento y creación posterior de cuerpos crecionales en las mismas, como cannonballs y paramoudras, durante el proceso de diagénesis; tectonismo y nuevo ciclo erosivo con participación de agentes erosivos atmosféricos y biológicos; evolución pseudokárstica reciente de los relieves más compactos de arenisca, con formación de cavidades y geoformas, en la cual la actividad biológica también aporta su quimismo a las aguas de infiltración.

Incluso, nosotros pensamos que pudieron ocurrir en el pasado fases de más intensa karstificación, con generación de redes de cavernas. Pero al tratarse de una costa que ha experimentado una elevación del nivel marino del orden de 110 m en los últimos 10 mil años (tras finalizar el último ciclo glacial), los vestigios de redes antiguas a cotas inferiores quedarían sumergidos bajo el nivel marino actual, en unos casos, o habrían sido destruidos por el rebajamiento y denudación experimentado por el relieve de superficie. Se puede decir que, a diferencia de otros karsts de montaña, la posición costera de los afloramientos Eocenos hace que sólo se conserven cuevas formadas en épocas recientes, Holocenas, un lapso de tiempo muy corto en general, y mucho más corto si pensamos que los procesos de arenización y denudación de superficie ocurren en la arenisca a mayor velocidad que en el karst clásico o en el karst en cuarcita. De hecho, la desagregación de la arenisca en arena por disolución del cemento hace de las areniscas carbonáticas un tipo de roca poco propicio a la formación de cuevas (Maire, 1980; Galán, 1991).

Durante el ciclo kárstico actual, Holoceno, en la meteorización de la roca han ejercido también su influencia los seres vivos, que habitan en vegetación y suelos. Particularmente por procesos bioquímicos y actividad bacteriana, que aporta a las aguas de infiltración ácidos orgánicos reactivos. Ha sido comentado en la Parte 1 (hipótesis Gaia) que en cierto sentido las bacterias del suelo actúan como catalizadores del proceso de erosión de las rocas, de modo que los ciclos biogeoquímicos pueden también contemplarse como equivalentes biológicos de ciclos catalíticos (Lovelock, 1979; Margulis, 1989).

En el proceso pseudokárstico, a partir de cierto momento en la evolución del sistema intergranular de vacíos, se alcanza situaciones de inestabilidad en partes del acuífero cercanas a las paredes internas de las cuevas, de formas cóncavas, y aquí se pasa de una fase isotrópica a otra fase anisotrópica, donde la reactividad química de las soluciones hace emerger de modo espontáneo patrones de estructuras disipativas, las cuales dan origen a extravagantes geoformas y diseños de coloración.

Muchas grutas y cuevas aportarán a su vez refugio y abrigo a seres vivos, desde vertebrados superiores, como zorros, aves que construyen sus nidos aprovechando la estructura en panal de abejas de los boxworks, lagartos, y diversos invertebrados.

Así, el loop entero puede ser visto como un gigantesco ciclo de retroalimentación, que comprende plantas, suelos y rocas, animales y gases atmosféricos, soluciones y cristales, microorganismos y océanos, los cuales intervienen en los procesos de regulación y



Figura 9. Detalles de fauna y flora en el pseudokarst de Jaizkibel. Las cavidades suministran abrigo a muy diversas especies. ¿No es todo parte de un gran ciclo? En la naturaleza hay redes dentro de redes. Con múltiples interacciones entre los seres vivos, las rocas, la atmósfera y los océanos.

autoorganización de la biosfera, a lo largo de su evolución. Las geoformas de Jaizkibel son sólo una pequeña parte que separamos del todo por abstracción. La inteligencia que resulta de descomponer el todo y analizar sus partes, se completa con el camino inverso de síntesis. Y con ello se enriquece sin duda la comprensión de los fenómenos naturales.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las peculiaridades que presenta el pseudokarst de Jaizkibel, para los que estamos acostumbrados al karst clásico, no dejan de sorprendernos. Probablemente deberíamos comparar a distintas escalas el trazado de galerías del endokarst clásico con la red de vacíos que presenta a pequeña escala el acuífero intergranular en la arenisca o sus redes de geoformas.

Así como todo trazado tiene una dimensión fractal, seguramente encontraríamos similitudes a diferentes escalas, en las cartografías de unos y otros. O las diferencias a nivel fractal podrían poner de manifiesto rasgos distintivos de los respectivos sistemas. Este es sin duda otro tema que emerge como sugerencia para los interesados en estudios del karst.

Para nosotros lo más sorprendente ha sido descubrir aspectos, como la formación de patrones poligonales o precipitación rítmica, que pueden ser explicados por reactividad química, difusión y convección, en sistemas complejos sílice-carbonatos. En el karst clásico también operan procesos de autoorganización, pero habitualmente pueden ser explicados por mecanismos lineales, como el establecimiento de redes de drenaje subterráneo en terrenos permeables por fisuras y conductos.

En bioespeleología ha sido utilizada como herramienta de análisis, sobre todo para fauna acuática stygobia, la distinción entre terrenos permeables en pequeño (ambiente intersticial) y terrenos permeables en grande (sistemas kársticos) (Delamare Deboutteville, 1960). Aunque desde un punto de vista faunístico hay intercambios entre ambos medios, las aguas subterráneas circulan en ellos de modos diferentes, poseyendo el primero una permeabilidad de intersticios y el segundo una permeabilidad por fisuras y conductos. Los ejemplos hasta ahora hallados en la arenisca de Jaizkibel colocan a este pseudokarst en una situación de frontera entre ambos tipos.

De igual modo Bakalowicz (1982) y Mangin (1982) han explicado satisfactoriamente el karst como un sistema donde no sólo interviene la disolución y solubilidad de los materiales (aspecto químico), sino también la tasa de disolución, el tiempo de realización de las reacciones químicas, aspectos dinámicos de la circulación de las aguas, y aspectos hidrogeológicos asociados a condiciones morfogenéticas. El karst es en esencia un sistema y la karstificación un proceso asociado al establecimiento de una red de drenaje subterráneo. En el interior del sistema existe una interacción entre la cinética de los equilibrios químicos responsables de la disolución y la velocidad y características de las circulaciones (Galán, 1991).

La arenisca de Jaizkibel se comporta en parte como un medio poroso, cuya porosidad se incrementa al progresar la disolución, y donde la arenización dificulta la creación de conductos por tubificación o piping. Pero en el interior del sistema las aguas subterráneas actúan sobre sistemas complejos sílice-carbonatos, con ocurrencia de procesos de precipitación y recementación parciales en el interior del acuífero intergranular. Estos pueden estar asociados a variaciones hidrológicas y a la propia dinámica de los flujos líquidos, pero lo interesante es que a tenor de las concentraciones y reactividad química de los distintos componentes minerales, puede producirse de modo espontáneo difusión y convección multicomponente, dando lugar a fenómenos no-lineales, propios de sistemas disipativos, los cuales no pueden ser explicados por las concepciones lineales corrientemente en uso en estudios del karst clásico.

Las geoformas halladas en las cuevas de Jaizkibel muestran estructuras y formas inusuales en hidrogeología del karst, las cuales traducen procesos de autoorganización y formación de patrones, impulsados por mecanismos de disipación de energía. Y estos pueden ocurrir porque involucran soluciones que contienen carbonatos, sílice, y probablemente muchos otros elementos (óxidos e hidróxidos de hierro, de aluminio, sulfatos, silicatos) en pequeñas cantidades. Su reactividad química es propia de sistemas multicomponentes. Y por consiguiente los procesos de disolución y precipitación en el interior del acuífero adquieren mayor complejidad. Esto genera la creación de patrones que dan a lugar a geoformas por demás diversas: boxworks, celdas poligonales, alveolos de distinto tipo, bandas de Liesegang, bandas troqueladas, bandas de Moebius, figuras de intercepción que involucran nódulos y estructuras de corriente, y una gran diversidad de cavidades y geoformas, desconocidas para el karst clásico y para el karst en cuarcita (Galán & Nieto, 2010).

La no-linealidad de algunos de estos fenómenos ha requerido que nos extendiéramos en describir conceptos propios de la teoría de sistemas complejos. El esfuerzo habrá valido la pena si conseguimos hacer llegar al lector una explicación más consistente de cómo ha ocurrido la génesis de geoformas en las cavidades de Jaizkibel. Geoformas que son a la vez originales, extravagantes y típicas de esta litología, y que resultan inusuales y novedosas en estudios del karst. El trabajo trata también de aportar una visión más amplia y enriquecedora de la multiplicidad de factores y aspectos involucrados en tan peculiar pseudokarst.

Bateson (1980) en una parte de su obra *Mind and Nature* explicaba en una serie de enunciados "lo que todo escolar debe saber", ya que notaba que entre los universitarios y profesionales norteamericanos existía una laguna muy extraña en su manera de pensar, la cual emanaba de la falta de ciertas *herramientas* del pensamiento. Concretamente, la falta de conocimiento de los presupuestos o premisas, no sólo de la ciencia, sino también filosóficos y epistemológicos. E ironizaba que "aquellos a quienes ni siquiera se les ocurre que es posible estar equivocados, no pueden comprender otra cosa que habilidades prácticas". Enunciar de manera formal o explícita una premisa es desafiar la sutil resistencia, no de un pensamiento contradictorio con el enunciado -ya que no conoce las premisas contradictorias ni cómo formularlas- sino de una cultivada sordera, inculcada desde niños. Se refería al pensamiento mecanicista, creyendo en la importancia de las premisas científicas, y en la idea de que hay mejores y peores maneras de construir las teorías científicas. Para dicho autor el incremento del saber se deriva de una combinación de información, procedente de varias fuentes. Las

versiones múltiples del mundo arrojan más luz e intelección que las simples porque indagan en las pautas que conectan los fenómenos. Y por tanto en los patrones.

Puede parecer poco ortodoxo el enfoque sistémico utilizado. Pero el análisis no sólo se basa en procesos lineales. Es necesario también entender procesos no-lineales, porque si se quiere descender a analizar la complejidad, enseguida se descubre que los procesos no-lineales predominan en la mayor parte del mundo real, ya que este constituye una red de fenómenos fundamentalmente interconectados e interdependientes. Los enfoques sistémicos a menudo chocan también con los sistemas sociales de dominación, que son por su misma naturaleza explotadores y antiecológicos. El cambio de paradigma del mecanicismo al pensamiento sistémico implica no sólo una expansión de nuestras percepciones y modos de pensar, sino también de nuestros valores; el paso de la asertividad a la integración, de lo analítico a lo sintético, de la cantidad a la calidad, de la explotación a la conservación, de la dominación a la cooperación (Capra, 1998). Una visión del mundo que no reconoce valor alguno en lo que usufructúa, en otras formas de vida distintas, o en el entorno natural, conlleva una ética egocéntrica y destructiva. El reconocimiento de valores inherentes a toda la naturaleza viviente está basado en la experiencia profundamente ecológica y sistémica de que Naturaleza y uno mismo son uno (Capra, 1998). El cuidado fluye naturalmente cuando el "sí mismo" se amplía y profundiza hasta el punto de sentir la protección de la Naturaleza libre como la de nosotros mismos. Si nuestro "sí mismo" abarca a otro ser, no precisamos de ninguna exhortación ética o moral para evidenciar cuidado (Sachs, 1995).

Las estructuras ordenadas y los hermosos patrones que presentan las geoformas halladas en las cavidades de Jaizkibel, no sólo revisten un alto interés científico, sino que poseen un gran potencial cultural, didáctico y formativo, lo que basta para propiciar y recomendar ampliamente su cuidado y conservación. Esa es nuestra principal conclusión.

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros y colaboradores que nos han acompañado en las exploraciones y estudios sobre el pseudokarst de Jaizkibel, sus cavidades y geoformas, y de modo especial a Marian Nieto, Iñigo Herraiz, Carolina Vera, Aize García, Michel Molia, y Carlos Oyarzabal. A Luis Viera, Franco Urbani y Carolina Vera por la revisión del manuscrito y sus valiosas recomendaciones y sugerencias. Por último, quisiera agradecer especialmente a Fritjof Capra por su esclarecedora orientación.

BIBLIOGRAFIA

- Ashby, R. 1947. Principles of the Self-Organizing Systems. *Journal of General Psychology*, 37: 1-125.
- Ashby, R. 1956. *Introduction to Cybernetics*. Ed. John Wiley, New York.
- Bakalowicz, M. 1982. La genèse de l'acuífère karstique vue par un géochimiste. *Karst Larra* 82; Publ. Serv. Geol. Dip. Navarra: 159-174.
- Bateson, G. 1979. *Mind and Nature: A Necessary Unity*. E.P.Dutton, New York.
- Bateson, G. 1980. *Mente y Naturaleza*. Amorrortu editores S.A., Icalma, Buenos Aires.
- Bénard, H. 1900. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Rev. Gen. Sci. Pure Appl.*, 11: 1261-1309.
- Bertalanffy, L. 1950. The Theory of Open Systems in Physics and Biology. *Science*, 111: 23-29.
- Bertalanffy, L. 1968. *General System Theory*. Ed. Brazillier, New York.
- Bohinski, R.C. 1991. *Bioquímica*. 5ª edición. Addison-Wesley Iberoamericana, Delaware, USA, 739 p.
- Campos, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. *Munibe, S.C.Aranzadi*, 31(1-2): 3-139.
- Capra, F. 1988. *The Tao of Physics*. Ed. Shambala, Boston.
- Capra, F. 1998. *The Web of Life*. Anchor Books, New York.
- Capra, F. 2009. *La trama de la vida: Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Ed. Anagrama, Compactos, Barcelona.
- Cerisier, P.; S. Rahal & H. Azuma. 2007. Pattern dynamics of the Bénard-Marangoni instability in a medium aspect ratio container. *Second Internat. Symp. Instability and Bifurcations in Fluid Dynamics. Journal of Physics: Conference Series*, 64: 1-9.
- Colinet, P.; A. Nepomnyashchy & J. Legros. 2002. Multiplication of defects in hexagonal patterns. *Europhys. Lett.*, 57: 480-486.
- Cocks, L. R. M. & A. Parker. 1981. The evolution of sedimentary environments. In: Cocks, L. R. M. *The Evolving Earth*. British Museum (Natural History), Cambridge Univ. Press, II (4): 47-62.
- Delamare Debutteville, C. 1960. *Biologie des eaux souterraines littorales et continentales*. Ed. Herman, Paris, 740 p.
- Eigen, M. 1971. Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4 (2-3): 149.
- Galán, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas silíceas y rocas carbonáticas: un estudio comparado. *Munibe (Ciencias Naturales), Soc. Cienc. Aranzadi*, 43: 43-72.
- Galán, C. 2010. Evolución de la fauna cavernícola: mecanismos y procesos que explican el origen de las especies troglodias. *Bol. SVE*, 44: 22 pp + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 31 pp.
- Galán, C. & J. Lagarde. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima. *Kartologia*, 11-12: 49-60.
- Galán, C. & F. Herrera. 2005. Le système Roraima Sud au Venezuela: La plus grande cavité du monde creusée dans les quartzites. *Spelunca, FFS*, nº 99 - Septembre 2005: 17-22.
- Galán, C. & F. Herrera. 2006. El sistema Roraima Sur, Venezuela, y la formación del karst en cuarcitas. *Bol. SEDECK*, 6: 18-27.
- Galán, C. & C. Oyarzabal. 2009. Análisis por microscopio electrónico de barrido (SEM) y microanálisis por dispersión de energía (EDX) de una muestra de Paramoudra (Formación Jaizkibel, País Vasco). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 10 pp.
- Galán, C. & C. Vera Martin. 2009. Análisis por espectroscopía Raman de una sección continua de Paramoudra (muestra 4a) en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 12 pp.
- Galán, C. & M. Nieto. 2010. Bandas de Moebius, Boxworks y otras raras Geoformas en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 30 pp.

- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2007. Pseudokarst en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa. Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 44 pp. + Pag web Cota0.com, Art. Cienc., 44 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2009. Formes pseudokarstiques dans le grès du flysch éocène côtier en Guipúzcoa (Pays basque espagnol). *Karstologia*, Assoc. Franc. Karstol. & Fed. Franc. Spéléol., 53: 27-40.
- Galán, C.; C. Vera Martín & M. Molia. 2009. Análisis por espectroscopia Raman y XPS de muestras de Paramoudras en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 11 pp.
- Galán, C.; C. Vera Martín & M. Molia. 2010. Datos por espectroscopia Raman de envolturas (gangas de separación) y tubos de Paramoudras en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 11 pp.
- Gleick, J. 1987. *Chaos*. Ed. Penguin, New York.
- Graham, R. 1987. Contributions of Hermann Haken to our understanding of Coherence and Selforganization in Nature. In: Graham, R. & A. Wunderlin (Eds.), *Laser and Synergetics*. Ed. Springer, Berlin.
- Haken, H. 1983. *Laser Theory*. Ed. Springer, Berlin.
- Haken, H. 1987. *Synergetics: An Approach to Self-Organization*. In: Eugene Yates (Ed.). *Self-Organizing Systems*. Ed. Plenum, New York.
- Heisenberg, W. 1971. *Physics and Beyond*. Ed. Harper & Row, New York.
- Jérez Mir, L.; Esnaola, J. & V. Rubio. 1971. Estudio Geológico de la Provincia de Guipúzcoa. Mem. IGME (Inst. Geol. y Min. España), Tomo 79, Madrid, 130 pp + Fotograf.
- Koschmieder, E.L. 1993. *Bénard Cells and Taylor Vortices*. Cambridge University, Cambridge, U.K.
- Kruit, C.; Brouwer, J. & P. Ealey. 1972. A Deep-Water Sand Fan in the Eocene Bay of Biscay. *Nature Physical Science*, 240: 59-61.
- Lovelock, J. 1979. *Gaia*. Oxford University Press, New York.
- Mainguet, M. 1972. Le modelé des gres. *Problèmes généraux*. I. *Geographique National*. Paris.
- Maire, R. 1980. *Éléments de Karstologie physique*. Spelunca, FFS, Special nº 3, 1980 - Nº 1 supplément, 56 pp.
- Mandelbrot, B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. Ed. Freeman, New York.
- Mangin, A. 1982. L'approche systemique du karst, consequences conceptuelles et methodologiques. *Karst Larra* 82, Publ.Serv.Geol. Dip.Navarra, 141-157.
- Margalef, R. 1974. *Ecología*. Ed. Omega, Barcelona, 951 p.
- Margulis, L. 1989. *Gaia: The Living Earth, diálogo con Fritjof Capra*. The Elmwood Newsletter, Berkeley, California, 5 (2).
- Martini, I. P. 1978. Tafone weathering, with examples from Tuscany, Italy. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 22(1): 44-67.
- Martini, J. 1982. Karst in Black Reef and Wolkberg Group quartzite of eastern Transvaal escarpment, South Africa. *Bol. Soc. Venezol. Espeleol.*, 10(19): 99-114.
- Maturana, H. & F. Varela. 1972. *De máquinas y seres vivos*. Ed. Universitaria, Santiago de Chile. Reimpreso in: Maturana & Varela. 1980. *Autopoiesis: The Organization of the Living*. Reidel, Dordrecht, Holanda.
- Maturana, H. & F. Varela. 1990. *El Árbol del Conocimiento: Las bases biológicas del conocimiento humano*. Ed. Debate, Madrid.
- McCulloch, W. & W. H. Pitts. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. Mathemat. Biophysics*, 5: 115.
- Mustoe, G. E. 1982. The origin of honeycomb weathering. *Geological Society of America*, 93: 108-115.
- Nagy, I.P. & J.A. Pojman. 1993. Multicomponent convection induced by fronts in the chlorate-sulfite reaction. *J. Phys. Chem.*, 97 (13): 3443-3449.
- Oparin, A. I. 1922. *El origen de la vida*. Reedit in: Ed. Lenguas Extranjeras, Moscú, 1955 & Ed. Akal, S.A., 1993, Barcelona.
- Peitgen, H.; H. Jüegens; D. Saupe & C. Zuhlten. 1990. *Fractals: An Animated Discussion*. VHS/color/ 63 minut, Freeman, New York.
- Petzall, W. 1967. Sedimentación marina. In: *Ecología Marina*. Margalef et al. Edit., Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Caracas, Cap. 2: 35-66.
- Prigogine, I. 1967. Dissipative structures in chemical systems. In: S. Claesson (Ed). *Fast reactions and primary processes in chemical kinetics*. Interscience, New York.
- Prigogine, I. 1980. *From Being to Becoming*. Ed. Freeman, San Francisco.
- Prigogine, I. & P. Glandsdorff. 1971. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuation*. Ed. Wiley, New York.
- Prigogine, I & I. Stengers. 1984. *Order out of Chaos*. Ed. Bantam, New York.
- Robles, S.; V. Pujalte & J. García-Mondejar. 1988. Evolución de los sistemas sedimentarios del Margen continental Cantábrico durante el Albiense y Cenomaniense, en la transversal del litoral vizcaíno. *Rev. Soc. Geol. España, Márgenes continentales de la Península Ibérica*, Vol. 1 (3-4): 409-441.
- Rosell, J. 1988. Ensayo de síntesis del Eoceno sudpirenaico: El fenómeno turbidítico. *Rev. Soc. Geol. España, Márgenes continentales de la Península Ibérica*, Vol. 1 (3-4): 357-364.
- Sachs, A. 1995. Humboldt's legacy and the restoration of science. *World Watch*, March-April 1995.
- Semwogerere, D. & M. Schaltz. 2001. Evolution of hexagonal patterns from controlled initial conditions in a Bénard-Marangoni convection experiment. *Cent. Nonlinear Sci. & School of Physics, Georgia Inst. Technol., Atlanta*, 2001: 1-4.
- Simoyi, R. 1999. Pattern formation and symmetry-breaking bifurcations fueled by dissipation of chemical energy: a possible model for morphogenesis? *Pure Appl. Chem.*, 71 (6): 1007-1017.
- Stewart, I. 1989. *Does God Play Dice?* Ed. Blackwell, Cambridge.
- Turing, A. 1952. The chemical basis of morphogenesis. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, (B) 237: 37-72.
- Twidale, C. 1982. *Granite landforms*. Amsterdam. Elsevier: 372 pp.
- Ueda, Y.; J. Thomsen; J. Rasmussen & E. Mosekilde. 1993. Behavior of the solution to Duffing's equation for large forcing amplitudes. *Mathematical Research*, 72: 149-166.
- Urbani, F. 1981. Karst development in siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield. *Proc. 8th Inter. Congr. Speol.*, 2 : 548.
- Urbani, F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia*, 11(6): 298-300.
- Van Den Berg, E. 2009. *Imitando la vida: biomorfos*. National Geographic, Diciembre 2009, Vol. 25 (6): 12 pp.
- Van Vliet, A. 1982. Submarine fans and associated deposits in the Lower Tertiary of Guipúzcoa (Northern Spain). Thesis Doct., Univ. Utrecht, Netherlands, 180 pp.
- Young, Y. & H. Riecke. 2002. Mean flow in hexagonal convection: stability and nonlinear dynamics. *Physica D*, 163: 166-183.