

LA DINÁMICA DE SISTEMAS COMPLEJOS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL MEDIO AMBIENTE

Complex systems dynamic in the Earth and Environment Sciences

Ignacio Meléndez Hevia ()*

RESUMEN

La estructura, composición y dinámica de los sistemas complejos compone el núcleo de la asignatura de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Introducir al principio del curso unas breves nociones de cibernetica y de termodinámica de sistemas alejados del equilibrio constituye una herramienta conceptual útil.

ABSTRACT

The core of the subject of Earth and Environment Sciences lies on the structure, composition and dynamic of the complex systems. A brief introduction at the beginning of the course, giving some basic notions about cybernetics and non-equilibrium system thermodynamics will prove to be a useful conceptual tool.

Palabras clave: Ciencias de la Tierra y medioambientales, sistemas complejos, atractor, propiedades emergentes.

Keywords: Earth and environment Sciences, complex systems, atractor, emergent properties.

INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS PREVIOS

Un **sistema** es una parte del Universo que aislamos para su estudio y a la que asignamos unos límites que pueden ser reales o imaginarios; en este sentido podemos considerar que la atmósfera, la hidrosfera, el planeta entero, o bien una bacteria o una empresa son sistemas, ya que el término no implica un tamaño, una complejidad o unas características determinadas (Von Bertalanffy, en Anguita, 1993).

La práctica totalidad de los sistemas intercambian con su entorno materia y energía, por lo que se clasifican como **sistemas abiertos**. En los sistemas que tienen cierta complejidad podemos describir su **composición** (la enumeración y descripción de sus componentes), su **estructura** (la forma en que estos componentes se articulan e interactúan entre sí) y su **dinámica** (las transformaciones energéticas y los tipos de trabajo que realiza el sistema cuando está en funcionamiento).

En estos sistemas complejos es frecuente encontrar **mecanismos de realimentación** (también llamados de retroalimentación o retroacción), que son relaciones causales circulares por las cuales el funcionamiento del sistema afecta a su propia dinámica. Un ejemplo de realimentación es el que tiene lugar en las zonas de rift, en los que la distensión producida por la divergencia de las corrientes convectivas en el manto fractura la litosfera. La fractura permite el inicio de la actividad volcánica; el vulcanismo contribuye a la separación de los bloques a ambos lados de la fractura y esta separación permite la continuación de la actividad volcánica, que llega

a estabilizarse incluso cuando desaparece el movimiento convectivo profundo que inició el rifting.

Otro ejemplo de realimentación ocurre en la formación de nubes convectivas: el ascenso de una masa de aire cálido y húmedo hacia zonas de menor presión atmosférica causa su expansión y como consecuencia su enfriamiento, lo que lleva a producir la condensación del vapor y la formación de una nube. El enfriamiento atenúa su flotabilidad, pero la condensación de su vapor de agua emite el calor latente de vaporización y la calienta de nuevo, con lo que vuelve a ganar flotabilidad y continúa su ascenso (Fig. 1).

Cuando se activa su dinámica, un sistema realiza **trabajos disipativos**, es decir: trabajos que no son reversibles, como producción de calor, de vibraciones, de ruido, rotura o deformaciones inelásticas de materiales, etc. Pueden realizarse además **trabajos conservativos** como acumular energía química en una molécula, evaporar agua, levantar una masa a cierta altura o deformar elásticamente un material. Estos trabajos conservativos acumulan la energía que se empleó en su realización en forma de una energía potencial que puede ser reutilizada, pero con mayor o menor rapidez la energía que el sistema es capaz de acumular acaba empleándose en trabajos que la degradan y la hacen inutilizable.

Un **sistema complejo** es aquel cuya dinámica interna, basada en procesos de realimentación, le permite llegar a estados muy diferentes desde situaciones de partida aparentemente idénticas, es

(*) I.E.S. "Isidra de Guzmán", C/ Gardenia, 29. 28803-Alcalá de Henares, Madrid. alianto456@hotmail.com

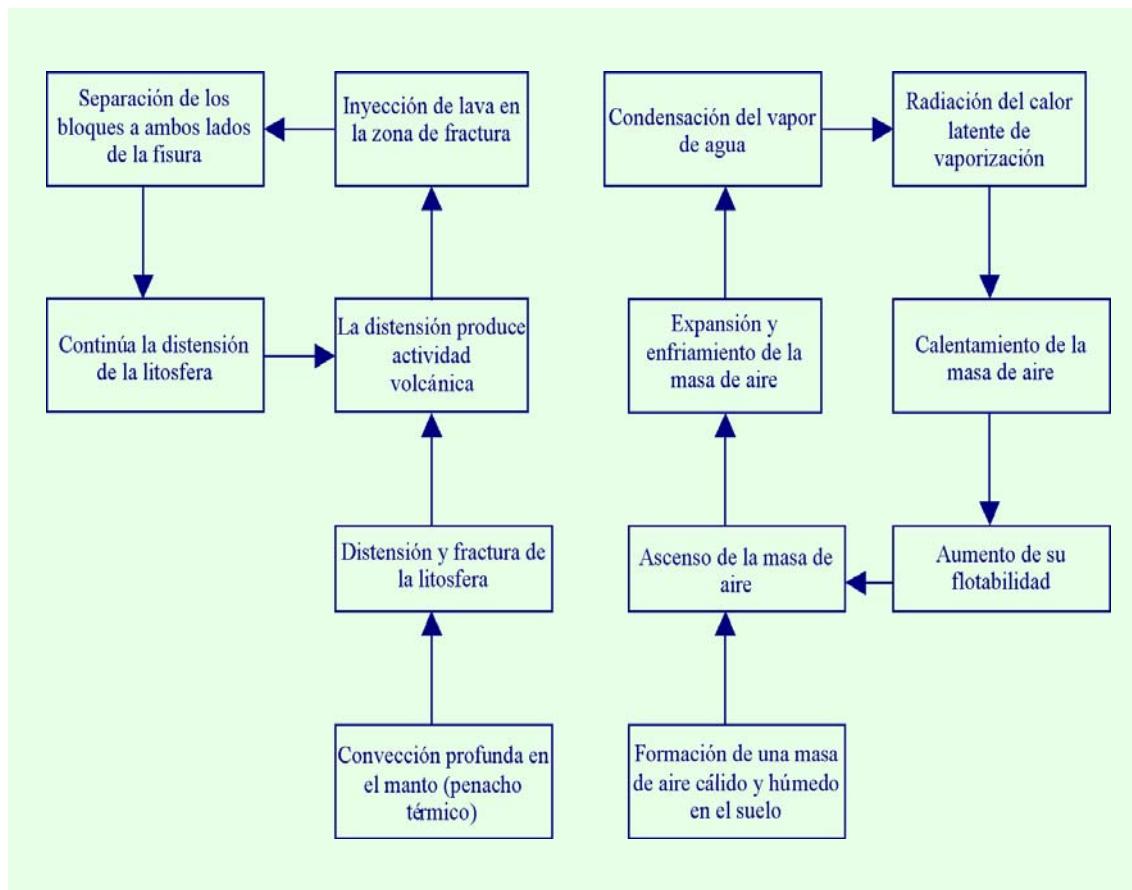


Fig. 1. Mecanismos de realimentación en una zona de rifting y en la formación de una nube de origen convectivo. La realimentación hace que la dinámica del sistema influya sobre su propio estado. En estos ejemplos el sistema tiende a estabilizar su funcionamiento en un estado de transformación constante de energía en trabajo.

dicir: tiene **sensibilidad a las condiciones iniciales**. La atmósfera es un ejemplo clásico de sistema complejo con sensibilidad a las condiciones iniciales, ya que a partir de situaciones meteorológicas extremadamente parecidas el sistema puede evolucionar hacia estados muy diferentes en cuestión de pocas horas.

La hidrosfera, la corteza terrestre y la biosfera también son sistemas complejos, aunque de diferente grado de complejidad. En la asignatura de Ciencias de la Tierra y Medioambientales (CTM) se estudia la composición, la estructura y la dinámica de estos cuatro subsistemas del sistema Tierra, así como su interacción con el sistema humano (Alda, 2003; Reguant, 1993; Rojero, 2000; San Miguel de Pablos, 2004).

Antes de comenzar en la asignatura el estudio detallado de estos subsistemas es útil definir y aportar ejemplos de algunos términos que se pueden usar en su análisis: complejidad, emergencia, atractor y otros. Si los alumnos comprenden estos conceptos y disponen de algunos ejemplos de referencia, les resultará más sencillo comprender los procesos que estudiarán a lo largo del curso en esta asignatura.

SISTEMAS COMPLEJOS Y ATRACTORES

El funcionamiento de un sistema implica siempre la realización de trabajos disipativos que dispersan la energía y acaban llevando al sistema al estado de reposo. Sin embargo algunos sistemas complejos pueden permanecer en funcionamiento durante un tiempo prolongado, lo que generalmente implica la existencia de:

- a) Una fuente de energía externa al sistema, y en muchos casos también una fuente externa de materia.
- b) Mecanismos en el interior del sistema capaces de captar esa energía y convertirla en energía útil para su funcionamiento.
- c) Mecanismos de eliminación de los residuos, tanto de materia como de energía, producidos durante su funcionamiento, es decir: mecanismos de evacuación de la entropía generada.

El funcionamiento sostenido de estos sistemas complejos representa en muchos casos un **estado estacionario** o de equilibrio en el que el flujo entrante de energía y materia compensa aproximadamente la materia utilizada y la energía degradada durante su funcionamiento; el sistema se encuentra funcio-



Fig. 2. Un huracán, como el ciclón tropical Game de formado en julio de 2007, es un sistema complejo alejado del equilibrio termodinámico, que perdura mientras existe el flujo de energía y materia que lo genera. Este flujo se origina debido a un fuerte gradiente de temperatura en la atmósfera. Cuando el gradiente se reduce, el flujo disminuye su intensidad y el sistema deja de existir. Los daños causados por el huracán son parte de los trabajos disipativos producidos durante su funcionamiento. (Cortesía de NASA Earth Observatory).

do gracias a un flujo de energía y materia que lo atraviesa, y con frecuencia ocurre que el propio sistema solo existe mientras dura este flujo (Fig. 2).

Estos estados estacionarios tienen un engañoso aspecto de estabilidad, y un análisis superficial puede llevar a la conclusión de que el sistema está en reposo, cuando en realidad puede estar produciendo trabajos disipativos con una gran intensidad. Un ejemplo de esta falsa apariencia de reposo lo tenemos en las nubes formadas en el barlovento de un relieve por el efecto Föhn: una mirada rápida a las montañas cuya cima está cubierta de nubes puede dar la impresión de que esa masa nubosa está ahí quieta, cuando en realidad lo que está ocurriendo es un complejo intercambio de materia, energía cinética y térmica entre la atmósfera, el relieve, el suelo y la biosfera, así como rápidos cambios de estado del agua, que pasa de vapor a líquido y luego de nuevo a vapor (Fig. 3). Lo mismo ocurre con la mayoría de las playas: una observación superficial da la impresión de que están formadas por una acumulación estática de arena, pero en realidad son una acumulación temporal de una masa de sedimento que es transportada por corrientes costeras de deriva, y en algunos casos el aspecto de la playa cambia de un año a otro. Un delta es un caso aún más claro de cuerpo sedimentario cuyo aspecto estático e inmutable es una falsa apariencia, ya que es el resultado de la interacción de un proceso de acumulación de arena (la sedimentación fluvial) y de erosión por parte del oleaje; mientras ambos procesos se equilibran el delta permanece más o menos estacionario, pero cuando uno de ambos predomina sobre el otro el delta cambia de aspecto con bastante rapidez. Tanto las nubes de efecto Föhn como las playas y los deltas no representan **estados de reposo o de equilibrio termodinámico**, sino estados estacionarios de **producción de trabajo, alejados de ese equilibrio**.

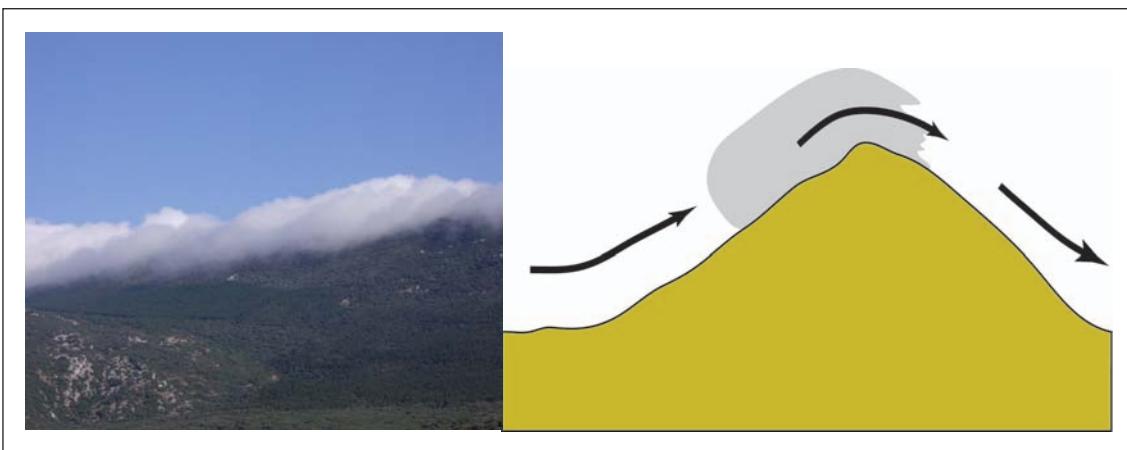


Fig. 3. Nubes de efecto Föhn. Al ascender por el barlovento del relieve el aire se expande, se enfriá, atraviesa su punto de rocío, y su humedad condensa. Parte de esta humedad pasa al suelo y parte de la energía cinética del viento se utiliza en trabajos disipativos como agitar la vegetación, erosionar el suelo o transportar materiales. Al descender por el sotavento y comprimirse de nuevo, el aire tiene menos humedad y esta se evapora antes, produciendo la desaparición de la nube. La masa nubosa es un sistema complejo, en un estado estacionario lejos del equilibrio termodinámico, es decir: no es un sistema “muerto” y aislado de su entorno, sino un sistema en el que la energía y la materia entrantes se equilibrان con la energía y la materia salientes con suficiente exactitud como para hacer que la nube permanezca aparentemente quieta y con un tamaño constante.

Los sistemas complejos, aunque en apariencia podrían encontrar un número incontable de estados estacionarios diferentes, curiosamente acaban tropiezando una y otra vez con un pequeño surtido de ellos. Estos estados a los que el sistema va a parar reiteradamente son sus **atractores**. Los atractores reciben ese nombre por su aparente capacidad para atraer al sistema hacia una forma concreta de funcionamiento, hacia una configuración dinámica estable.

¿Por qué tropieza con unos pocos atractores un sistema complejo? No es una cuestión fácil de responder, porque se trata de sistemas en los que interviene un gran número de variables y que tienen una estructura complicada, con intrincadas relaciones causales que forman bucles de realimentación imbriados entre sí, pero un ejemplo puede darnos una pista: imaginemos una hilera de mil bombillas, cada una de las cuales tiene un interruptor con el que podemos apagarla o encenderla; cada bombilla es por lo tanto un elemento binario, en el sentido de que tiene dos únicos estados: encendido y apagado. Junto a cada una hay una persona que la encenderá o la apagará según unas normas que ella misma decide, basándose en el estado de otra u otras bombillas. Hay un reloj que emite un pitido a intervalos regulares, y cuando suena el pitido cada persona acciona o no el interruptor. Recordemos que cada individuo puede inventarse su propia regla, por ejemplo, el que tiene la bombilla 754 puede fijarse en las bombillas 14 y 932, y decidir que solo encenderá la suya si tanto la 14 como la 932 están encendidas. Tal vez quien maneja la bombilla 612 decida que solo encenderá la suya si está apagada la bombilla 380; y quizás quien

manipula la bombilla 579 decide que solo apagará la suya si está encendida la bombilla 1 y apagada la 249. Naturalmente es importante que, una vez fijadas estas reglas, cada persona se mantenga fiel a ellas.

Acto seguido se pone en marcha el reloj, y las bombillas comienzan a parpadear con cada pitido, a medida que cada persona, siguiendo sus propias reglas, apaga o enciende la suya según el estado de sus bombillas de referencia. Lo curioso es que, transcurrido un tiempo, comienza una pauta repetitiva: el sistema compuesto por las mil bombillas empieza a repetir un ciclo en el que parpadean siguiendo el mismo orden, repitiendo la misma pauta. El sistema ha encontrado un **atractor** en su comportamiento, o en la terminología de los ingenieros, un *ciclo límite*.

Este resultado es más sorprendente e importante de lo que parece, y lo curioso es que ocurre siempre, y con tanta más facilidad cuanto mayor es el número de "bombillas" o de elementos binarios. Kauffman (1993, 2003) llama a estos sistemas formados por un gran número de elementos binarios conectados entre sí por reglas aparentemente sin sentido, "*redes booleanas aleatorias*". Estas redes, cuando su número de componentes aumenta, aumentan su número de atractores. Dependiendo de cuál sea la configuración de partida acaban en un ciclo límite o en otro. Una sola "bombilla" de diferencia, en un conjunto de decenas de miles, puede ser suficiente para que el sistema acabe en un atractor o en otro: el sistema presenta sensibilidad a las condiciones iniciales.

La atmósfera (Fig. 4) es un ejemplo de sistema complejo; su complejidad es de hecho muy grande,



Fig. 4. Calles de nubes. Se forman cuando el gradiente de temperaturas en el nivel bajo de la troposfera es suficientemente alto para originar un régimen de convección organizado según células de Bénard, que forman un mosaico hexagonal de corrientes ascendentes, ocupando las descendencias los centros de los hexágonos. La presencia de un viento meteorológico constante estira los hexágonos hasta convertirlos en alineaciones nubosas. Los cúmulos alineados indican las ascendencias. En la atmósfera se producen situaciones reconocibles: aunque no hay dos días en que el cielo sea idéntico, las calles de nubes son una situación que se produce con frecuencia; es un atractor del sistema atmosférico.

y sin embargo acaba encontrando repetidamente unas cuantas formas de funcionamiento muy concretas y fácilmente reconocibles: aunque la variedad de formas que presentan las nubes se nos antoja infinita, lo cierto es que las nubes se pueden clasificar en tan solo diez tipos, cada uno de los cuales se forma en unas condiciones atmosféricas concretas de gradiente térmico, viento, humedad relativa, etc.

La hidrosfera y la geosfera también son sistemas complejos, y también tienen una dinámica fuertemente restringida que los conduce a estabilizar su funcionamiento en un conjunto limitado de atractores que se corresponden, como en el caso de la atmósfera, con configuraciones concretas. Las corrientes oceánicas, como la corriente termohalina, las corrientes de deriva o los afloramientos, son ejemplos de atractores del sistema oceánico; los penachos térmicos, la subducción y el *lifting* son ejemplos de atractores de la geosfera.

El estudio de los atractores tiene sin embargo un pequeño problema: pueden reconocerse cuando aparecen, pero es imposible en casi todos los casos predecir su aspecto en un sistema cuya dinámica no conocemos bien: un experto en meteorología puede saber que, dadas unas condiciones concretas, se formará un determinado fenómeno meteorológico, como una tormenta o nieblas matinales, y lo sabrá porque ya lo ha visto muchas veces, pero alguien experto en sistemas complejos que no supiera cuáles son los atractores de la atmósfera, aunque conociera bien las leyes físicas que la gobiernan, no sería capaz de realizar predicciones fiables: no sabría adivinar cuántos y cuáles son los atractores del sistema antes de verlos. Dicho de otra forma: cuando sabemos cuáles son los posibles atractores de un sistema complejo y sabemos cuáles son las condiciones iniciales que lo llevan a cada uno de ellos, podemos realizar predicciones con alguna garantía, y siempre con la limitación de la sensibilidad del sistema a las condiciones iniciales, pero normalmente es imposible saber qué atractores aparecerán en un sistema al que no hemos visto en funcionamiento, aunque conozcamos su composición y su estructura.

PROPIEDADES EMERGENTES Y SISTEMAS ADAPTATIVOS

Un alud de nieve, un huracán y el oleaje que batte contra un acantilado son procesos que consumen diferentes tipos de energía mediante la realización de trabajos disipativos, pero esos trabajos son muy diferentes: el alud consiste en una masa de hielo y nieve que ha acumulado energía potencial y que la transforma en un desplazamiento cuesta abajo de estos materiales, a la vez que produce ruido, vibraciones, rotura de árboles, etc., hasta que su energía potencial se dispersa definitivamente. Carece de capacidad para mantenerse en funcionamiento durante un período prolongado, y las pautas de desplazamiento, de movilización de materiales o de destrucción que produce son muy simples, no es un sistema complejo, sino simplemente un fenómeno aislado.

El huracán se forma también debido a una masa de aire que ha acumulado energía potencial debido a un fuerte gradiente de temperatura en la atmósfera, pero sus pautas de funcionamiento son más estables y permanecen mientras dura el gradiente de temperatura y el aporte de materia en forma de aire caliente y húmedo. Los efectos que produce son más complejos y a menudo el sistema se acopla a otro, la superficie del océano, multiplicando su capacidad de producir trabajos disipativos, incrementando su fuerza a costa de disminuir su velocidad, lo que desde nuestra perspectiva representa un aumento de su capacidad destructora (Fig. 5). La perdurableidad, la capacidad para encontrar un estado estacionario alejado del equilibrio transformando un flujo de energía en una producción continua de trabajos, y su capacidad para acoplarse a otros sistemas lo distinguen del alud y nos permite clasificarlo como sistema complejo.

El oleaje también se forma como respuesta de la superficie del océano a un aporte de energía cinética, y una vez activado se caracteriza por realizar trabajos disipativos que imprimen sobre la litosfera unas huellas muy características: un modelado del paisaje. El oleaje es un tipo concreto de sistema complejo, es un agente geológico.

El modelado del relieve es un proceso que se produce ordenadamente y siempre está condicionado por el estado y las características de la superficie terrestre. El oleaje, por ejemplo, produce

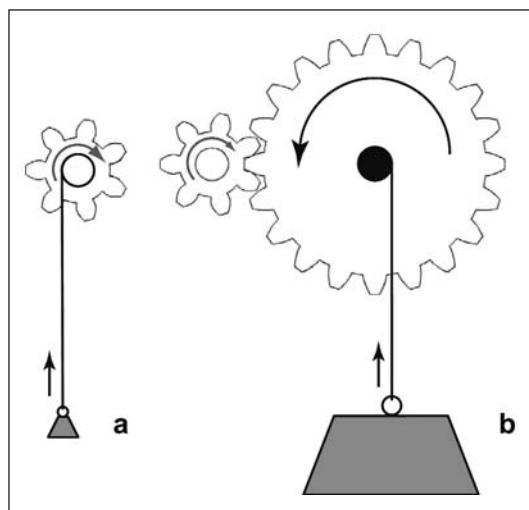


Fig. 5. La baja viscosidad de la atmósfera le permite moverse rápidamente cuando recibe energía en forma de un fuerte gradiente térmico, pero limita su capacidad para producir trabajos que requieran mucha fuerza, mientras que la hidrosfera, de mayor densidad y viscosidad, sí puede realizarlos. El acoplamiento de ambos sistemas puede compararse a un piñón pequeño (la atmósfera) que gira velozmente y puede ejercer poca fuerza, acoplado a una corona de mayor diámetro (la hidrosfera) cuyo giro es más lento pero que desarrolla una fuerza mucho mayor. La atmósfera puede transmitir su potencia a la hidrosfera y realizar así trabajos de gran envergadura.

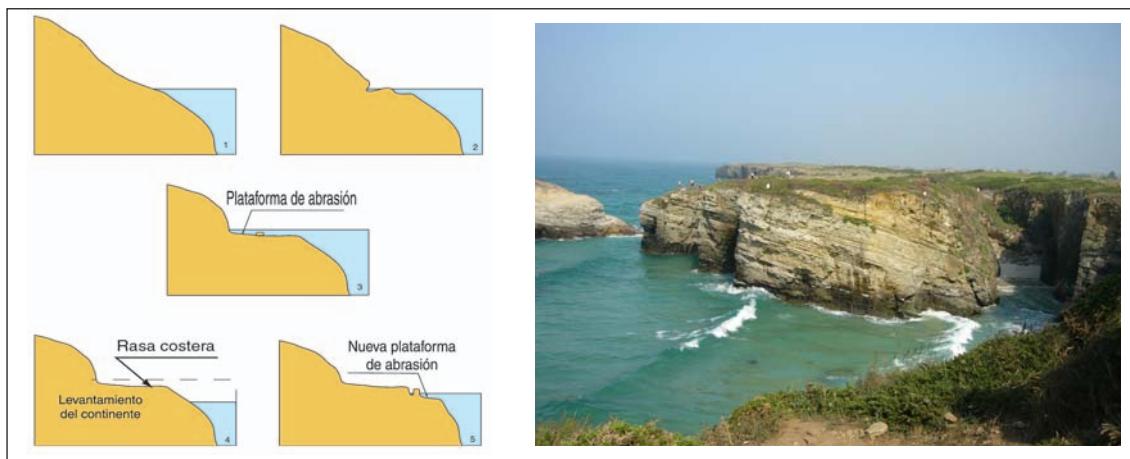


Fig. 6. El oleaje es un agente geológico y puede entenderse como un sistema complejo que presenta una propiedad emergente: la elaboración de un modelado característico del relieve. Este modelado se puede reconocer incluso cuando el sistema ya no está funcionando allí. La foto muestra la rasa costera de la costa cantábrica (la playa de las Catedrales, en Lugo). La rasa costera es una plataforma de abrasión elaborada por el oleaje, que ha sido levantada por encima del nivel del mar.

efectos diferentes si bate contra una costa acantilada, contra una playa o contra un arrecife, pero en cada caso se suceden ordenadamente una serie de fenómenos (Fig. 6), y la sucesión es tan ordenada y característica que si vemos el modelado podemos reconocerlo fácilmente, incluso aunque la línea de costa ya no esté allí. La actuación del agente geológico origina una evolución identificable y hasta cierto punto predecible del relieve. Podemos decir que el modelado y la evolución del relieve hacia la formación de penillanuras es una **propiedad emergente** del funcionamiento de los agentes geológicos, igual que el ciclo del agua es una propiedad emergente del sistema atmosférico. Aunque no hay un consenso claro sobre cómo definir las propiedades emergentes de un sistema, podemos decir que son las que muestra el sistema cuando está en funcionamiento, y que pueden reconocerse porque originan procesos ordenados. Por ejemplo podemos llamar "sistema" a un corrimiento de tierras, podemos incluso elaborar un modelo digital de su funcionamiento con la finalidad de tomar medidas preventivas, pero a pesar de que la dinámica de un fenómeno de ladera presenta algunas pautas reconocibles, como la formación de cicatrices cóncavas en la pendiente, no podemos decir que sea un sistema complejo, ni tampoco que el trabajo disipativo que realiza al producir daños en una urbanización sea una propiedad emergente, porque es un trabajo caótico cuyos resultados dependen en gran parte del azar, y que en treinta corrimientos de tierra distintos producirá treinta resultados diferentes.

Una propiedad emergente que con frecuencia presentan los sistemas complejos que encuentran estados estacionarios en su funcionamiento, es una forma de inercia, de resistencia al cambio. Esta resistencia al cambio es tanto mayor cuanto más intrincados son los mecanismos que contiene el sistema para transformar la energía en trabajo, y cuantos

más **elementos amortiguadores** presenta en su estructura. Estos elementos amortiguadores son los que retardan la respuesta del sistema a cambios en las condiciones físicas o químicas de su entorno: pueden ser dispositivos acumuladores de energía que pueden cargarse o descargarse si el aporte externo disminuye o aumenta, por ejemplo la litosfera que puede acumular calor dilatándose y abombándose; el vapor de agua que puede almacenar o liberar calor latente, masas que pueden ascender o descender acumulando o liberando energía potencial, gases que pueden liberarse o acumularse disueltos a gran presión, etc., pueden ser también dispositivos amortiguadores de cambios químicos, como los iones carbonato y fosfato que pueden hacer de tampon químico, sustancias que pueden oxidarse o reducirse en el interior de un sedimento dependiendo de las condiciones del entorno, etc. Sea de un modo u otro, cuando un sistema complejo contiene estos mecanismos amortiguadores presenta una inercia, una capacidad para resistirse a los cambios, para amortiguarlos o para retardarlos.

Hay sistemas que representan un caso extremo de inercia y de resistencia al cambio: son los **sistemas adaptativos** o sistemas homeostáticos. Estos sistemas son capaces de mantener en valores prácticamente constantes una serie de variables físicas y químicas que son características de su funcionamiento y que son en cierto modo identificativas de su estructura y dinámica. Estos sistemas complejos homeostáticos producen además modificaciones en su entorno manteniéndolo adecuado para ellos. Los únicos sistemas adaptativos conocidos son los sistemas biológicos (Anguita y Arsuaga, 2000).

El modificar nuestro entorno y hacerlo más conveniente para nuestros intereses puede entenderse como una forma de exportar nuestro orden interno, de propagar y extender nuestra estructura hacia el exterior, de rodearnos de un entorno que tiene a su vez una frontera con el medio externo. Creamos así

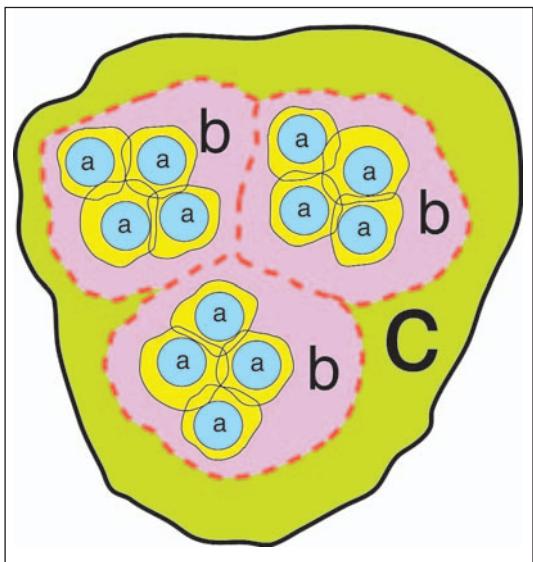


Fig. 7. Los sistemas biológicos (a) pueden interactuar entre sí originando una entidad de mayor complejidad (b) que se comporta a su vez como un sistema homeostático con propiedades emergentes propias. Estos sistemas pueden interactuar, agruparse y originar una entidad de rango superior (c), etc. Se origina así una estructura de niveles de complejidad anidados, característica de muchos sistemas biológicos; por ejemplo (a) puede representar los orgánulos celulares, (b) las células y (c) un tejido; o bien (a) puede representar individuos de una especie, (b) las diferentes poblaciones que habitan en un ecosistema y (c) la biocenosis.

un “colchón” que nos facilita la tarea de amortiguar los cambios y de mantener nuestra homeostasis (Fig. 7).

Los seres vivos poseemos muchas otras propiedades que se pueden describir como propiedades emergentes, y de ellas se ocupa la biología, pero desde el punto de vista del estudio de sistemas presentamos otras dos propiedades destacables:

a) Dos o más de estos sistemas pueden acoplar su funcionamiento y originar un sistema de entidad mayor, compuesto por elementos vivos, que presenta a su vez propiedades emergentes. Las asociaciones simbióticas y las sociedades coloniales son ejemplos de este acoplamiento. Algunos ejemplos de simbiosis muy conocidos son los de las algas zooxantellas con los corales y las esponjas, así como la endosimbiosis de bacterias que dio lugar a la célula eucariota (Margulis, 1967).

b) La existencia de un “depósito de información”: uno o más dispositivos capaces de acumular información sobre la composición, la estructura y la dinámica del sistema, sobre las propiedades del entorno y sobre las posibles contingencias que pueden ocurrir, así como de las respuestas que el sistema debe producir en cada una de ellas. Estos depósitos de información son el ADN, el sistema nervioso y, recientemente, diversos dispositivos exosómicos

como los libros, los ordenadores, los discos compactos, etc. Esta propiedad está totalmente ausente en los sistemas complejos no vivos: los sistemas no vivos pueden dejar huellas de su actuación, pueden producir la acumulación de información sobre su historia (eso son el registro geológico y el registro fósil), pueden activar con su dinámica la dinámica de otros sistemas cuando se acoplan con ellos, pero carecen de un depósito de información del que extraer instrucciones sobre, por ejemplo, cómo responder ante un cambio en las condiciones del entorno.

LOS ATRACTORES DE LA BIOSFERA. OPTIMIZACIÓN

Los sistemas complejos encuentran atractores, modos de funcionamiento estable, que representan situaciones estacionarias alejadas del equilibrio termodinámico mientras son atravesados por un flujo de energía, o de energía y materia, que parecen atraer al sistema hasta estabilizarlo en ellas. Los atractores biológicos se presentan a muchas escalas de tamaño y de complejidad, pero siempre representan estructuras, morfologías o dinámicas optimizadas para una función concreta.

La optimización es un concepto familiar para los matemáticos e ingenieros: hay problemas que admiten diversas soluciones, y en algunos casos hay una que es mejor que las demás. Podemos recordar el problema de cómo obtener una caja de cartón de volumen máximo a partir de una pieza de cartón de unas medidas y una forma determinadas; estos problemas son casos sencillos de optimización que se utilizan para familiarizar a los alumnos con el cálculo diferencial. La biosfera utiliza otro procedimiento de optimización: produce muchos individuos con ligeras variaciones y los expone a una determinada presión de selección. Aquellos que presentan un funcionamiento más eficaz para reproducirse en el contexto de ese entorno concreto producen más descendencia por lo que sus genes aumentan su frecuencia en la población. Por este procedimiento la biosfera encuentra diferentes tipos de atractores:

a) Estructuras moleculares optimizadas, como determinadas enzimas, la molécula de glucógeno y otras moléculas cuya estructura se ha podido demostrar matemáticamente que presentan una estructura optimizada para la función que realizan (Meléndez *et al.*, 1999).

b) Rutas metabólicas optimizadas, como el ciclo de las pentosas-fosfato (Meléndez-Hevia *et al.*, 1994).

c) Estructuras anatómicas optimizadas, como aletas, ojos, alas, etc.

d) Estrategias evolutivas estables: relaciones inter- o intraespecíficas que se ajustan a un intercambio optimizado en términos económicos.

No es sorprendente que un mismo atractor aparezca en sistemas que en apariencia son muy diferentes pero que tienen una dinámica comparable;

cuando esto ocurre hablamos de convergencia evolutiva.

Dentro de las estrategias evolutivas estables se encuentran determinadas configuraciones de los ecosistemas que Margalef (1992) denominaba “ecosistemas bajo tensión”: ecosistemas que son mantenidos en una situación de intensa producción primaria por la presencia de unos consumidores primarios de tamaño relativamente grande que, al eliminar cualquier brote de árbol o arbusto, no permiten avanzar la sucesión ecológica.

Esta situación, este atractor, es especialmente potente si el medio está eutrofizado y la producción primaria es alta permitiendo así la existencia de esos herbívoros grandes; es un atractor al que la biosfera ha ido a parar en repetidas ocasiones: durante el mesozoico con los grandes reptiles herbívoros y durante el cenozoico con los grandes mamíferos herbívoros. En el Neolítico el ser humano encontró el mismo atractor, y se ha estabilizado cada vez más en él, hasta lograr en la actualidad que entre el 20 y el 25% de la producción primaria mundial se realice en campos de cultivo, que son ecosistemas bajo tensión cuya intensa producción primaria sostiene nuestra compleja civilización.

PROPUESTAS PARA EL AULA

1. Cuando un sistema se mantiene en funcionamiento durante un tiempo prolongado cabe sospechar que existe una fuente externa de energía que lo alimenta, aunque en algunos casos la fuente de energía se encuentra en el interior del sistema en forma de un enorme acumulador. La actividad 1 sirve para trabajar en el aula el análisis de las fuentes de energía de los sistemas, reconociendo de qué tipo es la energía inicial y cuáles son sus posteriores transformaciones.

2. El acoplamiento entre sistemas de diferente viscosidad descritos para la atmósfera y la hidrosfera se produce también entre los agentes geológicos y la litosfera: los primeros tienen una dinámica muy rápida a la escala del tiempo geológico y movilizan masas moderadas (los detritos y los sedimentos), mientras que la segunda tiene una dinámica mucho más lenta y desplaza masas mucho mayores. La subsidencia producida por la acumulación de sedimentos en una cuenca sedimentaria puede también representarse con el dibujo de la figura 5, en la que el caso (a) representa la actuación de los agentes geológicos y el (b) el acoplamiento entre estos y la litosfera.

Para que los alumnos se acostumbren a utilizar estas interpretaciones mecánicas de los procesos geológicos se les puede plantear la actividad 2.

3. Los elementos de un sistema que acumulan diferentes tipos de energía, que pueden constituir elementos amortiguadores de la dinámica del sistema en el sentido de retardar su respuesta a los cambios en las condiciones de su entorno, son causantes, en el caso de la litosfera, de diferentes riesgos geológicos (Brusi y Roqué, 1998). Resulta útil para los alumnos acostumbrarse a analizar estos riesgos en términos de una configuración de la litosfera en la que se acumula primero y se libera bruscamente después, algún tipo de energía. La actividad 3 es una propuesta de trabajo en este sentido.

BIBLIOGRAFÍA

- Alda, F.L. (2003). Modelos dinámicos en las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 11.2, 124-127.
- Anguita, F. (1993). Teoría General de Sistemas y Ciencias de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 1.2, 87-89.
- Anguita, F. y Arsuaga, J.L. (2000). ¿Es Gaia una teoría adelantada a su tiempo o una broma vitalista? Reflexiones para CTMA. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 8.3, 197-201.
- Brusi, D. y Roqué, C. (1998). Los riesgos geológicos. Algunas consideraciones didácticas. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 6.2, 127-137.
- Kauffman, S. A. (1993). *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press, New York.
- Kauffman, S. A. (2003). *Investigaciones*. Ed. Tusquets, Barcelona. Metatemas, 76.
- Margalef, R. (1992). *Planeta azul, planeta verde*. Ed. Prensa científica, S.A., Barcelona.
- Margulis, L. (1967). On origin of mitosing cells. *Journal of theoretical biology*, 14 (3), 225-274.
- Meléndez, R. (1999). Optimización de la estructura del glucógeno. (Tesis doctoral) Departamento de Biología Molecular, Universidad de La Laguna.
- Meléndez-Hevia, E., Waddell, T. G. & Montero, F. (1994). Optimization of metabolism: the evolution of metabolic pathways toward simplicity through the game of pentose phosphate cycle. *J. Theor. Biol.* 151, 249-283.
- Reguant, S. (1993). Consideraciones sobre los objetivos de la enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 1.3, 144-147.
- Rojero, F.F. (2000). ¿Una asignatura sistemática o sistemática? Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 8.3, 189-196.
- San Miguel de Pablos, J.L. (2004). Complejidad y dualidad en el Sistema Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 12.3, 243-247. ■

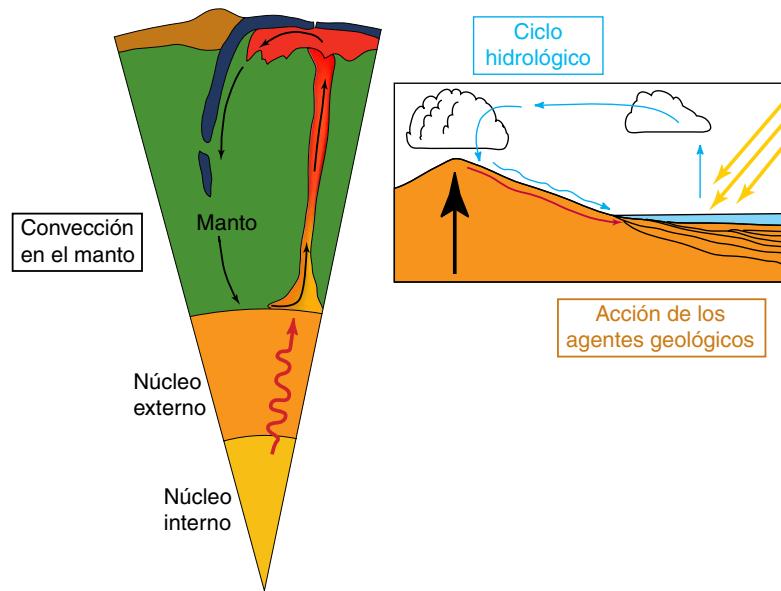
Fecha de recepción del original: 31/07/09

Fecha de aceptación definitiva: 19/10/09

ACTIVIDAD 1

La figura 8 muestra tres sistemas complejos relacionados con la dinámica terrestre: la convección en el manto, los trabajos de erosión, transporte y sedimentación realizados por los agentes geológicos, y el ciclo hidrológico. Indica en cada uno de qué tipo es la energía que alimenta al sistema e identifica las flechas que representan este aporte de energía.

Figura 8



Para analizar estos sistemas en términos de las transformaciones energéticas que ocurren durante su actividad, copia en tu cuaderno la siguiente tabla y complétala situando en cada cuadro la frase correspondiente de la lista:

Sistema	Energía aportada al sistema	Proceso que ocurre en el sistema ante el aporte de energía	Trabajo realizado por el sistema	Consecuencias del trabajo realizado
Ciclo hidrológico				
Agentes geológicos				
Convección en el manto				

- Energía térmica procedente del núcleo.
- Energía térmica solar
- Energía potencial gravitatoria del relieve.
- Ascenso de masas de roca a través del manto.
- Desplazamiento de sedimentos sobre la superficie terrestre.
- Desplazamiento de grandes volúmenes de agua en la atmósfera.
- Formación de masas de roca muy caliente y de baja densidad, que tienden a ascender.
- Formación de masas de aire caliente y húmedo que tienden a ascender.
- Formación de sedimentos que tienden a ser desplazados a favor de la pendiente.
- Formación de capas de sedimentos cuyo peso produce subsidencia en las cuencas.
- Aparición de agua líquida en la atmósfera que cae a la superficie terrestre (precipitaciones).
- Formación en la superficie terrestre de masas de roca fría y densa que tienden a hundirse (subducción).

Los procesos que ocurren en los sistemas cuando reciben el aporte de energía pueden interpretarse como una o más transformaciones energéticas:

Energía térmica → Energía potencial gravitatoria (flotabilidad de una masa de roca) → Energía cinética (movimiento).

Energía térmica → Energía potencial gravitatoria (flotabilidad del aire caliente) → Energía cinética (movimiento).

Energía potencial (relieve) → Energía cinética (movimiento)

Haz en tu cuaderno un dibujo esquemático de los sistemas representados y añade estas transformaciones energéticas indicando dónde ocurren.

ACTIVIDAD 2

La figura 9a representa de forma simplificada los procesos de **erosión, transporte, sedimentación, subsistencia** (hundimiento del fondo de una cuenca sedimentaria), y **levantamiento isostáctico** del relieve.

Figura 9a

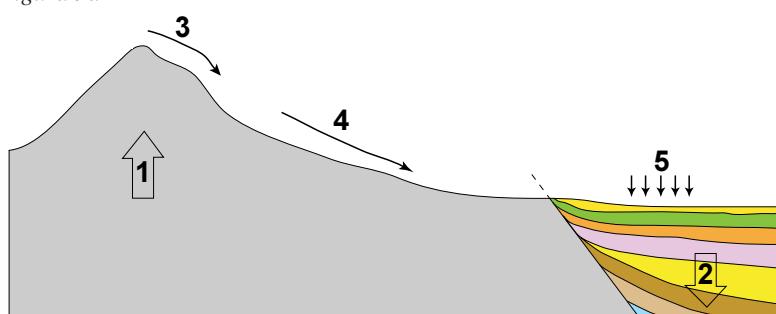
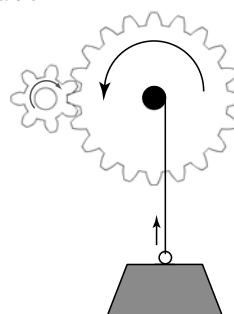


Figura 9b



Completa la siguiente tabla indicando qué proceso corresponde a cada número, si se trata de un proceso realizado por los agentes geológicos o por la dinámica interna terrestre, si es lento o rápido, y si su potencia es relativamente pequeña o grande.

Número	Proceso que representa	¿Pertenece a la dinámica externa o a la dinámica interna?	¿Es comparativamente lento o rápido?	Su potencia (masa movilizada por unidad de tiempo) es comparativamente grande o pequeña?
1				
2				
3				
4				
5				

La actividad de los agentes geológicos y la dinámica interna terrestre pueden representarse como en la figura 9b, con dos ruedas dentadas de diferente diámetro acopladas: una gira muy rápido y la otra más lentamente. Identifica los agentes geológicos y la dinámica interna terrestre con las ruedas dentadas de la figura, explicando por qué asignas a cada sistema la rueda pequeña o grande.

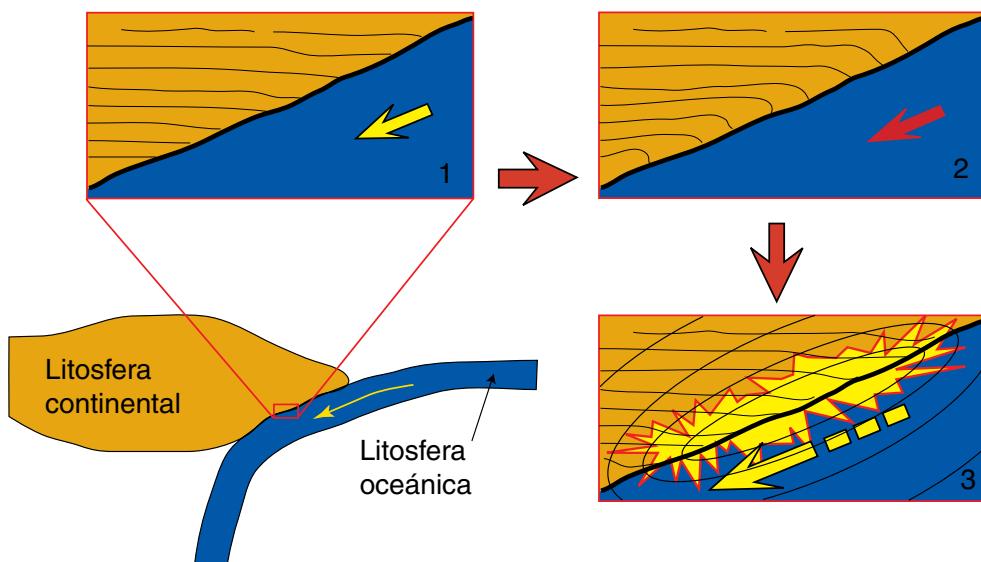
¿Por qué puede decirse que la actividad de los agentes geológicos se acopla a la dinámica interna terrestre?
 ¿De qué forma activan la erosión y la sedimentación los procesos de la dinámica interna representados?

ACTIVIDAD 3

Los riesgos geológicos se corresponden frecuentemente con situaciones en las que un proceso que ocurre en un sistema acumula una gran cantidad de energía que, al liberarse bruscamente, puede originar una catástrofe.

Los ejemplos de las figuras 10a y 10b representan este tipo de situaciones. En el primer caso las rocas de la litosfera continental acumulan energía elástica que es liberada bruscamente. En el segundo caso la masa de hielo de un glaciar en la cima de un volcán acumula energía potencial gravitatoria.

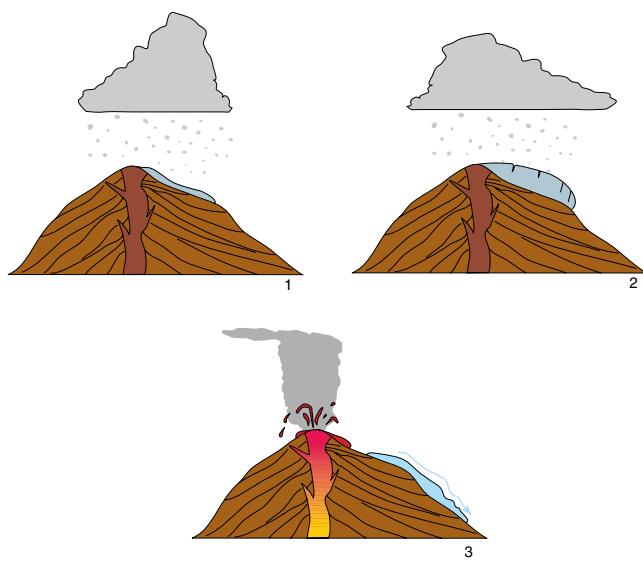
Figura 10a



Escribe una explicación de las figuras. ¿Qué riesgos geológicos están representados? ¿Qué trabajos producen estos sistemas una vez que se activa su dinámica? ¿Qué efectos destructivos pueden producir a su vez estos trabajos?

Analiza si se cumple en ambos casos el mecanismo de acumulación lenta y liberación rápida de energía por parte del sistema, indicando qué tipos de energía se acumulan y se liberan.

Figura 10b



Haz un dibujo esquemático para ilustrar el riesgo de incendio en un pinar en el que se ha ido acumulando con los años madera resinosa y añádele la explicación correspondiente analizando el riesgo en términos de acumulación lenta y liberación brusca de energía. ¿Qué tipo de energía es la que se acumula y se libera en este caso?

No todos los riesgos geológicos se ajustan a este esquema de acumulación lenta y liberación brusca de energía. Por ejemplo, una avenida fluvial producida por precipitaciones intensas es una respuesta rápida de un sistema fluvial a un fenómeno meteorológico. Cita otros ejemplos de riesgos que no se correspondan con una acumulación lenta de energía.