

Los procesos geológicos externos: las infinitas interacciones en la superficie de la Tierra

External geological processes. The endless interactions on the Earth's surface

DAVID BRUSI, CARLES ROQUÉ Y JOSEP MAS-PLA

Àrea de Geodinàmica Externa/GEOCAMB, Departament de Ciències Ambientals. Facultat de Ciències. Universitat de Girona. E-mail: david.brusi@udg.edu

Resumen Este texto desarrolla la idea 7 de la propuesta de 10 ideas clave contenidas en el documento sobre Alfabetización en Ciencias de la Tierra (Pedrinaci et al., 2013). En concreto, despliega los contenidos del epígrafe “Los procesos geológicos externos transforman la superficie terrestre”. Inevitablemente, al tratar este tema, también nos referiremos a las ideas clave 3, 4, y 9 de dicho documento que se centran respectivamente en “Los materiales de la Tierra se originan y modifican de forma continua”, “El agua y el aire hacen de la Tierra un planeta especial” y “Algunos procesos naturales implican riesgos para la humanidad”. Los objetivos de este artículo no pretenden abordar una descripción exhaustiva de los procesos externos. Nuestro principal propósito es ofrecer una visión panorámica clara y estructurada de aquellos conceptos más relevantes en su tratamiento docente.

Palabras clave: Geología, interacciones, procesos externos.

Abstract *This contribution develops the 7th idea out of the 10 Big Ideas that were defined within the document Alfabetización en Ciencias de la Tierra (Pedrinaci et al., 2013). In particular, we address the content related to the “External geological processes that transform the Earth surface”. While developing this topic, we will also refer to guidelines 3, 4, and 9 of the mentioned document devoted to the following topics: “Origin and transformation of Earth materials”, “Water and air turn the Earth into a special planet”, and “Some natural processes involve risks for humankind”. In this paper, we do not intend to furnish a detailed description of the external geological processes. Our main goal consists in offering a clear and structured perspective of the main concepts for their further treatment in class.*

Keywords: External processes, Geology, interactions.

LAS CATARATAS DE IGUAZÚ

A finales del 2011, una iniciativa internacional en la red¹, eligió las cataratas de Iguazú (Fig. 1) como una de las siete maravillas naturales del mundo. La Base de Datos Mundial de Cascadas² va, si cabe,

un poco más allá puesto que las sitúa en la primera posición de un ranking global. Su clasificación se fundamenta en criterios de magnitud, visibilidad, mínima antropización, entre otros indicadores.

Las cataratas de Iguazú se localizan entre la provincia argentina de Misiones y el estado brasileño



Fig. 1. Vista panorámica de las cataratas de Iguazú desde el sector brasileño.

¹ <http://sevensnaturalwonders.org/south-america/iguazu-falls/>

² La WWD: World Waterfall Database es una iniciativa creada por Bryan Swan y Dean Goss con el objetivo de establecer un polinomio que permita establecer un registro ordenado de las principales cascadas del mundo. <http://www.worldwaterfalldatabase.com/top-100-waterfalls/>

de Paraná, muy cerca de la frontera con Paraguay. A lo largo de un conjunto de más de 275 saltos, las aguas del río homónimo se precipitan al vacío con una altura total de caída de 82 m y con una anchura de casi 2,7 km. El río Iguazú drena una cuenca hidrográfica de forma alargada de unos 70.800 km². Nace cerca de la costa y discurre hacia el interior del continente debido a la elevación tectónica que sufrió el borde oriental de Sudamérica a finales del mesozoico. El curso principal es marcadamente meandriforme y entrega sus aguas al río Paraná y, a través de él, regresa al este para desembocar en el Atlántico, en el Río de la Plata.

El término Iguazú, en lengua guaraní, significa “aguas grandes”. De hecho, el caudal medio³ del río Iguazú se sitúa alrededor de los 1.750 m³/s, si bien, sufre fuertes oscilaciones estacionales que han llegado a mínimos de 200 m³/s y a máximos de unos 15.000 m³/s (en 2007 y 2011) o incluso superiores (17.300 m³/s en un pico de crecida en junio de 2013).

Las cataratas se emplazan sobre una sucesión de tres coladas de basalto que atestiguan la intensa actividad volcánica de las etapas iniciales de la apertura del océano Atlántico. La formación de las cascadas empezó a gestarse hace 1 o 1,5 millones de años, cuando la mayor fuerza erosiva del río Paraná encajó su cauce más profundamente que el de sus afluentes. Al descender el nivel de base, la erosión remontante fue capaz de excavar en la cuenca del Iguazú un profundo cañón que hoy en día alcanza más de 21 km de longitud y que, aguas arriba, culmina en el grandioso conjunto de saltos de agua.

LA CAPACIDAD TRANSFORMADORA DE LOS PROCESOS EXTERNOS

Las cataratas constituyen una espectacular evidencia de la poderosa capacidad de transformación de la superficie de nuestro planeta por parte de los procesos externos. La acción fluvial del río Iguazú tiene que ver con múltiples variables. Bajo las condiciones climáticas de la zona, el agua, el aire y los organismos alteran la estabilidad de las rocas, disgregándolas y descomponiendo sus componentes minerales. Una parte de las precipitaciones caídas en la cuenca fluvial arrastran progresivamente las partículas a posiciones de menor energía potencial. La carga de sedimentos transportados por el río incrementa su labor erosiva y es capaz de producir la remoción de los materiales dependiendo de la naturaleza de los mismos y de las estructuras que los afectan.

Complementariamente, en otros lugares del lecho, la disminución de velocidad del agua desencadena la formación de depósitos sedimentarios. En zonas propicias, estas mismas acumulaciones, pueden llegar a preservarse y convertirse en rocas sedimentarias e, incluso, albergar en su seno evidencias fósiles de formas de vida del pasado.

³ Según datos de la estación de aforo de Foz de Iguazú. Fuente: https://www.copel.com/ger/iguacu/historico_topo.jsp

En este sentido, los procesos exógenos son capaces de modificar intensamente el relieve construido por los procesos internos, de modelar sus formas, de determinar las características del medio físico que condicionan la distribución de la vida, de constituir recursos explotables por las actividades antrópicas o, por el contrario, convertirse en un riesgo para las personas y las propiedades.

La elección del ejemplo de las cataratas de Iguazú es absolutamente arbitraria. De hecho, a cualquier escala, cualquier lugar del mundo nos permitiría ilustrar el incesante dinamismo de los procesos de transformación de la superficie de la Tierra. Éste es el escenario de las más rápidas y profundas interacciones entre los sistemas terrestres: geosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera.

RECETA PARA UN MUNDO CAMBIANTE

Las partes sólidas de nuestro planeta constituyen su geosfera. La geosfera está integrada por las rocas y los materiales detríticos no consolidados que forman los suelos y los depósitos sedimentarios (regolito). Aunque, por su propia definición, la componen todas las capas hasta el centro de la Tierra, los procesos externos interaccionan con la geosfera sólo en su tramo más superficial de la corteza (por lo general, algunas decenas o centenares de metros).

La geosfera terrestre a menudo es considerada como una enorme “maquina térmica” que disipa su calor a través de su superficie (Alfaro, 2010). Desde el origen del planeta, este flujo de calor se expresa en la litosfera terrestre a través de una actividad geológica muy intensa que se manifiesta a través de los procesos internos: terremotos, ascenso de magmas, erupciones volcánicas, formación de cordilleras y depresiones, aparición de océanos, etc.

Los procesos internos son los “arquitectos” de la corteza terrestre, que construyen los “grandes bloques” y definen la estructura tridimensional en bruto. De este modo, la actividad tectónica -ya sea por levantamiento o por subsidencia- junto con el vulcanismo y los ajustes isostáticos sitúan los volúmenes rocosos en una determinada posición en la superficie en términos de energía potencial (Fig. 2). Una vez configurados los principales rasgos del relieve terrestre, son las interacciones de la geosfera con el resto de sistemas las que regulan las partes externas del ciclo petrogenético o modelan las formas del paisaje.

Si buscamos un símil didáctico para explicar los procesos externos, la cocina puede proporcionarnos una metáfora ilustradora. Del mismo modo que “entre fogones” cualquier receta requiere de unos ingredientes, de unas acciones sucesivas, de la aplicación de energía y de un tiempo de “cocción”, así podemos abordar el enfoque de los procesos superficiales que transforman el planeta. En este caso, la materia prima es la geosfera cuando interacciona con determinados **agentes** que actúan a lo largo de un periodo concreto de **tiempo**; las **acciones** son los mecanismos físicos y químicos que modifican los materiales geológicos

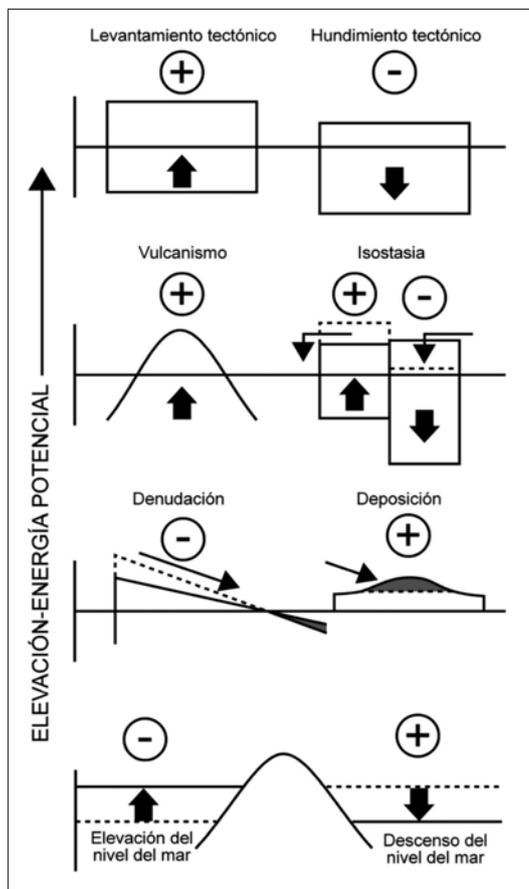


Fig. 2. Esquema sintético de las variaciones en los niveles energéticos, originados por la interacción entre la dinámica endógena y exógena (modificado de Summerfield, 1991, en Pedraza, 1996).

y la principal fuente de **energía** es la radiación solar en el contexto del campo gravitatorio terrestre. El resultado se manifestará en cada momento en forma de fenómenos, productos, modelados o depósitos bajo la influencia de algunos **factores condicionantes** (litología, estructura, clima,...). Este conjunto de de interacciones complejas en la superficie de la Tierra constituye lo que denominamos **procesos externos o exógenos**.

La interpretación inversa puede llegar a ser incluso más sugerente. Así, frente a un “plato” elaborado (una forma de modelado, un depósito, un fenómeno,...) podemos plantear el ejercicio intelectual de reconstruir el proceso que lo ha generado. Es decir, descifrar cuales han sido los agentes, las acciones, la energía, los factores y el tiempo que lo han originado. Ésta es una de las labores de la geología: reconstruir “recetas” o, lo que es lo mismo, desentrañar los sucesos. No obstante, al igual que en el arte culinario, las recetas no son fórmulas exactas. La influencia de cada agente, de cada acción, de cada factor, otorga a las variables de los procesos externos un abanico de posibilidades que puede conducir a infinitos resultados.

Tomemos como ejemplo la arena de una playa (Fig. 3). ¿Qué partículas la integran? ¿De dónde proceden? ¿Cuál es el área fuente de los minerales? ¿Por qué contiene restos vegetales, caparazones y



Fig. 3. Playa de Cala Estreta (Costa Brava, Girona). La arena de una playa permite formularse preguntas sobre los agentes, acciones y factores condicionantes que determinan su existencia y dinámica.

algunos residuos artificiales? ¿Cómo se alteraron las rocas que han dado lugar a las partículas minerales? ¿Quién ha transportado la arena? ¿Por qué los granos presentan un determinado diámetro? ¿Por qué se ha formado la playa en el lugar en el que se encuentra? ¿Por qué el oleaje ha erosionado la arena acumulada en las recientes obras de regeneración? Para responder a todas estas cuestiones deberemos identificar los agentes que han intervenido, dilucidar los mecanismos a través de los cuales han actuado, esclarecer cuales han sido las fuentes de energía, explicar cuáles han sido los factores condicionantes de los procesos e investigar durante cuánto tiempo, a qué ritmo y en cuantas etapas se ha originado el depósito.

LOS AGENTES: ARTÍFICES DEL CAMBIO

La atmósfera, la hidrosfera y la biosfera adquieren su capacidad de generar transformaciones sobre la geosfera porque a través del aire, el agua, los organismos y la especie humana adoptan el papel de **agentes**. Es decir, “constituyen entidades materiales que, respondiendo a una entrada de energía, se convierten en causas activas de cambios en la Tierra” (Bach *et al.*, 1988). Los agentes externos son capaces de provocar acciones, flujos y ciclos de influencia mutua que desencadenan efectos por doquier. Siguiendo el esquema expositivo de un trabajo anterior (Brusi, 2011), analicemos separadamente sus particularidades para percibir la extraordinaria capacidad de los procesos exógenos para establecer interacciones con los sistemas terrestres.

La Atmósfera es la envoltura gaseosa que constituye la capa más externa y liviana de la Tierra. El **aire** es el nombre que recibe la mezcla de gases que la componen. Debido a la gran compresibilidad de los gases, los niveles más cercanos a la superficie terrestre son mucho más densos que los superiores.

El análisis de un determinado volumen de aire seco y sin impurezas, a una presión normal y a 0°C, pone al descubierto que los cuatro gases mayoritarios representan el 99,997% de su composición: nitrógeno molecular (N_2), con un 78,084%; oxígeno molecular (O_2), con un 20,946%; argón (Ar) con un 0,934% y dióxido de carbono (CO_2), con un 0,033%. Otros gases están presentes en el aire en proporciones muy inferiores o como indicios. Entre ellos, es preciso destacar el hidrógeno molecular (H_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el monóxido de carbono (CO), el

ozono (O₃) y diversos gases nobles: helio, criptón y xenón. La atmósfera contiene, además cantidades variables de vapor de agua, amoníaco, yodo, ácidos, carburos y una elevadísima presencia de partículas en suspensión: polvo, humo, sales y microorganismos.

La atmósfera es una parte indisoluble de la dinámica de la superficie terrestre. Sin ella, no sólo no existiría la vida tal como la conocemos, si no que no podrían producirse muchos de los procesos e interacciones que caracterizan a nuestro planeta. Al margen del nitrógeno molecular y los gases nobles que no son reactivos y permanecen prácticamente inertes, algunos de los gases juegan un papel fundamental (Tabla I) en muchos procesos.

<ul style="list-style-type: none"> • El oxígeno molecular del aire no estaba presente en la atmósfera primigenia. Posiblemente empezó a formarse a partir del agua y el CO₂ procedentes de las erupciones volcánicas y como consecuencia de la hidrólisis inducida por la radiación solar. Sin embargo, en su mayor parte, debió surgir de las reacciones fotosintéticas de las primeras cianobacterias aparecidas en la Tierra hace más de 3.500 millones de años. La fotosíntesis utiliza el dióxido de carbono, el agua y la luz para producir glucosa y liberar oxígeno molecular (6CO₂ + 12H₂O + luz → C₆H₁₂O₆ + 6O₂ + 6H₂O). Las plantas, algas, y cianobacterias constituyen la mayor fuente de renovación del oxígeno atmosférico implicado en un complejo ciclo de consumo/regeneración.
<ul style="list-style-type: none"> • El oxígeno es imprescindible para la vida y su presencia en la atmósfera (o disuelto en el agua) crea un ambiente químicamente muy agresivo que ocasiona la oxidación de numerosos minerales (metales, carbonatos, sulfuros, etc.) para formar óxidos e hidróxidos. La presencia de oxígeno en la atmósfera con porcentajes equivalentes a los actuales se remonta a unos 400 millones de años (Cloud, 1981).
<ul style="list-style-type: none"> • El dióxido de carbono (y también el vapor de agua) tienen una gran influencia en las temperaturas atmosféricas puesto que absorben gran parte de las radiaciones ultravioletas e infrarrojas procedentes del Sol y el consecuente efecto invernadero.
<ul style="list-style-type: none"> • Algunos gases presentes en la atmósfera pueden combinarse con el vapor de agua y se convierten en ácidos. Así, por ejemplo el dióxido de azufre (SO₂) o el óxido de nitrógeno (NO₂) reaccionan con el agua para dar ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃). Su retorno a la superficie a través de las precipitaciones genera la "lluvia ácida". Aunque el SO₂ puede proceder de las erupciones volcánicas, tanto éste como el NO₂ proceden, en su mayor parte, de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales. También la combinación del CO₂ con el agua origina el ácido carbónico (H₂CO₃) que es capaz de atacar a muchos de los minerales que componen las rocas.

Tabla I. El papel de los gases atmosféricos en los procesos externos

La existencia de una Hidrosfera con abundante agua líquida es una singularidad de nuestro planeta en el Sistema Solar. Comprende todas las **aguas** superficiales (océanos, mares, lagos, ríos, glaciares, nieves, etc.) y también las aguas subterráneas. Su volumen total es de unos 1.360 millones de km³. Si comparamos esta cifra con el volumen total de la Tierra, representa poco más de una milésima parte (1,25‰). No obstante, la capacidad de interacción del agua con el resto de sistemas es excepcional.

Se sabe que el agua está presente en nuestro planeta desde hace más de 4.200 millones de años. Aunque su origen todavía es objeto de es-

tudio, su existencia es la prueba evidente que la Tierra ocupó y ocupa un lugar privilegiado en el Sistema Solar que le permitió atraparla, fijarla y conservarla.

Con una temperatura media próxima a los 15°C, el agua puede encontrarse en la superficie de la Tierra en sus tres estados: líquido, sólido y gaseoso. En su mayor parte (98,35%), permanece en estado líquido. Las especiales propiedades del agua (Tabla II) le otorgan un protagonismo indiscutible en los procesos externos.

<p>La composición química del agua, formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno con desigual fuerza de atracción entre los electrones, determina que, aunque no tenga carga eléctrica, presente un carácter dipolar. La atracción entre los enlaces de hidrógeno aumenta la cohesión entre sus moléculas. Ésta y otras peculiaridades le otorgan un comportamiento único:</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Un punto de fusión y ebullición que le permiten un amplio margen de temperaturas entre las cuales puede permanecer en estado líquido.
<ul style="list-style-type: none"> • Una alta tensión superficial, que confiere una forma redondeada a las gotas, crea una lámina en su superficie y favorece su adherencia a otros cuerpos.
<ul style="list-style-type: none"> • La capilaridad, que le permite ascender por conductos y poros de pequeño diámetro facilitando, por ejemplo, el ascenso que establece un manto capilar por encima de la zona saturada.
<ul style="list-style-type: none"> • Una densidad anómala que, a diferencia de la contracción progresiva de volumen que presentan otros materiales al enfriarse, el agua adquiere el mínimo volumen a los 4°C. Por debajo de este valor, su densidad disminuye. Esta singularidad permite que el hielo sea menos denso que el agua líquida y que flote por encima de ella. El aumento de volumen del hielo ejerce una presión extraordinaria cuando el agua se congela en los poros o grietas de una roca y es capaz de romperla.
<ul style="list-style-type: none"> • Una mala conductividad térmica, derivada de su alto calor específico (hace falta mucho calor para aumentar su temperatura), permite, por ejemplo, que la presencia de hielo en superficie y agua líquida en profundidad en las zonas frías facilite el mantenimiento de la vida. Esta propiedad también convierte la hidrosfera en un amortiguador de los cambios de temperatura atmosféricos, que se hace patente en los climas bajo la influencia oceánica o marina.
<ul style="list-style-type: none"> • Un fuerte carácter disolvente, hasta el punto de ser considerado "el disolvente universal". La mayor parte de sustancias se disuelven bien en agua. De este modo, las sales, los ácidos, algunos gases se combinan bien en el agua y una vez en ella son capaces de aumentar su reactividad química. La disolución de minerales de la geosfera, le permite movilizar la materia.

Tabla II. Las propiedades del agua y su papel en los procesos externos.

La **Biosfera** está concentrada fundamentalmente sobre la superficie terrestre. Las formas orgánicas están presentes desde las zonas más profundas del océano hasta la atmósfera. Aunque el volumen total de la biosfera es casi inapreciable en comparación con la geosfera, su capacidad de establecer interacciones es extraordinaria. Más del 95% del volumen de la biosfera se encuentra en los mares y océanos. La Vida en la Tierra apareció hace unos de 3.900 millones de años (Briones, 2010) y su existencia y evolución está estrechamente ligada a la presencia de agua líquida, a unas condiciones térmicas favorables y al carbono como unidad estructural insustituible.

La vida en la Tierra no es un sistema independiente pero, indudablemente, muchos procesos naturales no podrían mantener su actividad si no existiese la biosfera. La Biosfera siempre ha sido un factor de desequilibrio químico puesto que intercambia continuamente materiales con la atmósfera la hidrosfera y la geosfera, extrayendo de ellas su alimento y vertiendo en ellas sus desechos (Mediavilla, 2010).

La acción geológica de los seres vivos se ejerce cuando su actividad es capaz de construir o destruir partes de la geosfera. Prácticamente todas las formas de vida, desde las bacterias hasta los vegetales y animales se comportan como agentes externos.

La **especie humana** constituye, en sentido estricto, una parte de la biosfera. Sin embargo, la importancia y especificidad de su intervención ha animado a algunos autores a considerar un subsistema con perfiles propios: la **Antroposfera**. Este subsistema acoge la vida humana, sus actividades y acciones. En su conjunto, **la especie humana** solo representa el 0,0004% de la biomasa pero su capacidad de modificar la superficie terrestre la ha convertido en un agente de transformación muy importante a medida que progresaba el desarrollo tecnológico.

Las actividades antrópicas –sus construcciones, la explotación de los recursos, sus residuos, el transporte,...– causan impactos directos e indirectos sobre el medio físico y sobre el resto de sistemas. Nadie pone en duda actualmente que la actividad humana influye en la transformación de la superficie terrestre y es capaz de imprimir huella muy profunda en el relieve, el clima, el ciclo del agua, el suelo, o el ciclo del carbono o el nitrógeno, entre otros. Es más, la erosión causada por la agricultura en los últimos siglos y por los movimientos de tierras debidos, más recientemente, a la urbanización del planeta, permiten definir a la especie humana como un agente geológico más, cuya intensidad de denudación del relieve supera la de todos los otros procesos externos (Hooke, 2000; Wilkinson, 2005).

¿CÓMO ACTÚAN LOS PROCESOS EXTERNOS?

Las acciones llevadas a cabo por los agentes externos son muy diversas. Se expresan en forma de mecanismos de actuación físicos o químicos que afectan a los materiales de la geosfera. Los más comunes son la meteorización, la erosión, el transporte, la sedimentación,... Su papel es evidente en la hidrosfera y la atmósfera, pero la actividad biológica o incluso la acción humana también desencadenan efectos reductibles a estas mismas acciones físicas y químicas (Pedraza, 1996).

La **meteorización** o **intemperismo** es el primer paso en el complejo campo de interacciones de los procesos externos. Es la acción precursora del ciclo geológico de erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez Elorza, 2008). La meteorización es la transformación que experimentan los materiales de la corteza como respuesta a las condiciones de

proximidad o contacto con los agentes externos (según Reiche y Keller, 1950, en Brunsden, 1979). La meteorización se desencadena cuando los materiales geológicos que se habían originado a unas determinadas temperaturas, presiones y quimismos, se ven sometidos a unas nuevas condiciones que rompen su equilibrio y los transforman en otros productos más estables bajo las nuevas circunstancias. La meteorización es, por tanto, la respuesta o adaptación de los materiales terrestres a un ambiente dinámico.

La meteorización se distingue de la erosión porque en la primera, la disgregación o descomposición de los materiales se produce “in situ”. Es decir, con un desplazamiento nulo o muy limitado de los productos de alteración. En la erosión, en cambio, se produce una pérdida de masa dado que los componentes de las rocas son puestos en movimiento por los agentes que operan en la superficie terrestre y desplazados significativamente de sus posiciones originales.

Se habla de meteorización física o mecánica cuando los procesos físicos son los causantes de la fragmentación o disgregación de las rocas. Los mecanismos más comunes son: el **lajamiento**⁴ (*sheeting*), debido a la descompresión sufrida por los materiales geológicos al ascender en la litosfera; el **termoclastismo**, provocado por las dilataciones y contracciones que experimenta una roca a causa de las variaciones de temperatura (especialmente por los contrastes entre el día y la noche en rocas previamente debilitadas); la **gelifracción** (gelivación o crioclastia), que se produce en las zonas periglaciales donde los sucesivos ciclos de hielo y deshielo determinan la fragmentación de las rocas debido a la presión que el hielo ejerce en el interior de grietas y poros; el **hidroclastismo**, causado por el humedecimiento o secado del agua presente en las rocas o sedimentos y el **haloclastismo**, producido por la presión ejercida por los cambios de volumen de los cristales de sales precipitados en los poros de los materiales geológicos, ya sea a causa de su presión de cristalización, de su expansión térmica o de su expansión por hidratación.

La meteorización química es el conjunto de reacciones que modifican los componentes minerales de las rocas -bajo la influencia del agua, el aire o los seres vivos- transformándolos en productos más estables en las condiciones de la superficie del planeta. Los procesos de meteorización química más habituales son: la **hidrólisis**, que resulta de la reacción entre los minerales y los iones H⁺ i OH⁻ del agua, afectando, fundamentalmente a los silicatos; la **hidratación**, que es la absorción o incorporación de agua a una sustancia mineral cuando ésta comporta cambios composicionales; la **disolución**⁵, que

⁴ Algunos autores consideran el lajamiento como el resultado de esfuerzos compresivos (i.e.. Vidal-Romaní & Twidale (1999).

⁵ Algunos autores prefieren considerar la disolución un proceso externo que implica transporte de materia; en este sentido, el *carst* puede ser considerado un fenómeno de meteorización química o bien un proceso de erosión-transporte-precipitación

afecta a las sales solubles en contacto con el agua; la **carbonatación**, desencadenada a partir del CO₂ o del ácido carbónico contenido en el agua cuando se alteran los minerales que contienen Ca, Mg, Na, K o Fe y los transforma en carbonatos o bicarbonatos de estos metales; la **oxidación-reducción**, que actúa cuando un mineral pierde electrones a favor del oxígeno; y la **quelación**, consistente en la unión de un catión y un compuesto orgánico complejo que lo envuelve.

Un enfoque realmente novedoso de la meteorización química es el que la interpreta de un modo sistémico. Para ilustrarlo, remitimos al lector al trabajo de Martín-Chivelet (2010) en el que se describe la meteorización de los silicatos a partir del CO₂ transferido a la atmósfera por la dinámica interna (actividad volcánica, desgasificación metamórfica). En este proceso, los silicatos de calcio presentes en las rocas magmáticas reaccionan con el ácido carbónico. El bicarbonato y el calcio incorporadas al agua podrán precipitar en forma de carbonatos y dar lugar a depósitos (caparzones, arrecifes, espeleotemas, rocas carbonatadas,...). En este sentido, determinados eventos en la historia de la Tierra en los que el CO₂ atmosférico ha aumentado significativamente por un incremento global del vulcanismo pueden haber marcado etapas de cambios climáticos profundos y de una elevada transferencia de materia orgánica y carbonatos a la litosfera.

Las transformaciones inducidas por la meteorización producen numerosos cambios que afectan a los materiales. Pedraza (1996) destaca los siguientes:

- a) evolución hacia estados de equilibrio con las condiciones ambientales en la interfase Atmósfera-Hidrosfera-Litosfera
- b) transformaciones irreversibles
- c) modificaciones de volumen, densidad, tamaño de grano, consolidación, permeabilidad
- d) formación de nuevos minerales
- e) concentración de minerales menos alterables
- f) movimientos de transferencia, traslación, dispersión y agregación
- g) preparación de los materiales facilitando su erosión y transporte

Los productos de la meteorización constituyen un nivel de alteración de grosor variable que afecta al tramo más superficial de la geosfera en forma de alteritas y suelos. Los constituyentes más comunes son los minerales del grupo de las arcillas y los óxidos de hierro. En la meteorización química de las rocas y minerales silicatados, el grado de estabilidad sigue una escala⁶ en la que se ordenan los minerales, desde los más resistentes a los más alterables.

La **erosión** es el conjunto de procesos exógenos a través de los cuales los materiales geológicos son

⁶ La más conocida es la que propuso Goldich en 1938 y, en ella se hace evidente que el grado de estabilidad sigue el orden inverso al de las series de Bowen que establecen la secuencia de cristalización de un magma. O lo que es lo mismo, se ve que un mineral es tanto más susceptible a la meteorización química cuanto más contraste existe entre las condiciones ambientales de la superficie del planeta respecto a su lugar de formación (por lo que se refiere a la temperatura, presión y los enlaces químicos que de ellas se derivan).

eliminados y movilizados desde su posición original en la superficie terrestre a un lugar más alejado. La erosión comporta un **transporte** en el seno de un fluido (aire, agua, hielo) o un trabajo físico derivado de la acción antrópica del material previamente fragmentado o disuelto. Los productos transportados pueden ser desplazados en estado sólido, como fragmentos detríticos o en forma de iones, disueltos en agua.

La **sedimentación** es el proceso a través del cual las partículas de material sólido se acumulan -o los solutos precipitan- formando depósitos sedimentarios. En el caso de los materiales detríticos, la sedimentación se produce cuando disminuye la velocidad del fluido que los transporta. Los compuestos transportados en forma de iones pueden transformarse en partículas sólidas a causa de la evaporación del agua o de la precipitación inorgánica u orgánica (cuando la fijación de minerales está inducida por procesos metabólicos de organismos). También la acumulación directa de restos orgánicos (guano, plancton, vegetales,...) puede dar origen a depósitos sedimentarios de fosfatos, sapropeles o carbón. Los medios más favorables a la sedimentación reciben el nombre de sistemas deposicionales y suelen agruparse en tres tipos de ambientes sedimentarios: continentales (glaciales, fluviales, lacustres, desérticos,...), marinos (de plataforma, arrecifes, cuencas profundas,...) o de transición (playas, deltas, barras litorales,...).

LA ENERGÍA: EL MOTOR DEL CAMBIO

Ya hemos descrito los distintos agentes y, asimismo, analizado sus mecanismos de actuación en los procesos externos. El protagonismo del aire, el agua, los seres vivos y la especie humana es evidente. Sin agua, por ejemplo, no existiría la vida en la Tierra. Tampoco existirían la mayoría de las rocas sedimentarias ni se producirían la mayor parte de los fenómenos que desencadenan el dinamismo externo y hacen cambiar la superficie de nuestro planeta a un ritmo vertiginoso. No obstante, los agentes, por sí mismos tendrían una actuación limitada sin "combustible". El motor de las interacciones es la energía. Confiere a los agentes la capacidad para actuar, transformar y poner en movimiento.

La **radiación solar** es, sin duda, la inductora de la mayor parte de los procesos exógenos. La energía electromagnética procedente de nuestra estrella se transforma en calor al calentar las superficies y, desde ellas, por conducción, se transmite al aire y al agua. Las variaciones en la efectividad de la insolación dependen de la propia emisión solar, de la inclinación de los rayos solares, de la duración del día, del albedo, entre otros factores. Las diferencias de temperatura creadas en las capas fluidas del planeta originan un desigual calentamiento de las mismas, tanto altitudinal como latitudinalmente y desencadenan reajustes de densidades capaces de impulsar corrientes. Por su parte, el viento transfiere a las superficies líquidas la energía cinética que origina las olas.

La insolación induce la evaporación y la transpiración del agua y su paso a la atmósfera. También permite la fusión o sublimación del hielo. La tendencia al reequilibrio de temperaturas, presiones y humedad ambiental es la fuerza motriz que dinamiza toda la dinámica de la atmósfera e hidrosfera. La **energía solar** es la causante del movimiento del aire, de la transferencia en su seno del vapor de agua y los aerosoles. Los cambios de temperatura son responsables de la condensación, la formación de nubes y de las precipitaciones para restablecer el equilibrio atmosférico. La energía solar condiciona la variabilidad meteorológica y sus valores medios definen el clima.

La biosfera no es ajena a la influencia de la energía solar. La luz regula la actividad fotosintética de los vegetales con clorofila y permite la síntesis de materia orgánica transformando la energía luminosa y la materia inorgánica en energía química. Este es el primer eslabón de innumerables procesos metabólicos y de la compleja pirámide ecológica de relaciones tróficas que mantienen la vida en la Tierra.

La especie humana comparte con la biosfera la necesidad de obtener energía endosomática a través de la alimentación pero no es menos cierto que su capacidad transformadora de la superficie terrestre depende directamente de la tecnología que ha desarrollado y que está subordinada a la **energía exosomática** que procede, fundamentalmente, de la energía solar. La energía hidráulica, la energía obtenida de la biomasa o de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), la energía eólica o, más explícitamente, la fotovoltaica tienen su origen en la radiación solar. Incluso otras fuentes de energía como la mareomotriz, la geotérmica o la nuclear deben apoyarse para su obtención en labores que necesitan de las antes citadas.

Un segundo motor de los cambios externos es la fuerza de atracción gravitatoria. La meteorización, la actividad erosiva, el transporte y el depósito de sedimentos se producen bajo la influencia de la gravedad. La **energía potencial** relacionada con la posición que ocupa un elemento material en el campo gravitatorio terrestre es un factor insoslayable en el dinamismo exógeno. Su acción tiende a desplazar los materiales a posiciones de mínima energía potencial, desde las cumbres más altas al fondo de las más profundas fosas oceánicas. La gravedad determina el sentido de flujo de los fluidos: de las masas de aire, de las precipitaciones, de las aguas de arroyada, de los ríos, de los glaciares, de las aguas subterráneas,...

La gravedad también está implicada en los movimientos de laderas, los desprendimientos o los colapsos. En este sentido, algunos autores otorgan la consideración "procesos erosivos" a los movimientos de masas de materiales en las laderas a favor de la pendiente. Algunos, llegan a atribuir a la gravedad el papel de agente externo. ¿Lo es en realidad? ¿Un proceso gravitatorio actúa por sí mismo o requiere siempre de un factor desencadenante en el que está implicado otro agente?

La atracción gravitatoria es también la causa de la acumulación de las masas de agua en los océanos, los lagos o los acuíferos, de la compactación

de sedimentos y contribuye a la diferenciación de un suelo en sucesivos horizontes. En otro orden de cosas, la influencia gravitatoria de la Luna y el Sol, principalmente, origina las oscilaciones de marea de las aguas oceánicas.

FACTORES CONDICIONANTES

La aproximación a las interacciones de los procesos externos con la corteza ha sido planteada hasta ahora describiendo separadamente los distintos agentes, acciones y energías implicadas. La realidad es extraordinariamente más compleja. En muchas ocasiones, en la superficie del planeta actúan a la vez o de forma sucesiva los distintos fenómenos. Por otra parte, es necesario considerar también que la efectividad de todos los procesos externos y el peso relativo que adquiere cada una de sus variables depende también de algunos factores condicionantes. La influencia de estos factores es determinante en el resultado final obtenido. Los factores condicionantes más destacados en la dinámica externa son: la litología, la estructura, el clima, la pendiente y el tiempo.

El tipo de material (**litología**) define la composición mineral, y también su dureza, compacidad, textura, porosidad, entre otras características. Algunos procesos externos están estrechamente condicionados por estas propiedades. ¿Existe una relación entre los suelos y el tipo de roca madre? ¿Las rocas graníticas presentan unas morfologías particulares? ¿Un material muy poroso se alterará con mayor rapidez?

La **estructura geológica** (las superficies de estratificación, el buzamiento de las capas, los pliegues, las fallas, las diaclasas,...) definen, por ejemplo, superficies de discontinuidad que facilitan la actuación de los agentes externos. ¿Por qué el trazado de muchos ríos o torrentes coincide con zonas de falla? ¿Por qué las fracturas favorecen la meteorización y la erosión? ¿Unos estratos inclinados en la misma dirección de un talud pueden propiciar un desprendimiento?

El **clima** determina la temperatura y el régimen o el tipo de precipitaciones que definen la meteorización preponderante. También influye en la presencia y tipología de la vegetación. ¿Por qué la meteorización química es más efectiva en climas cálidos y húmedos? ¿Por qué la gelifracción no se da en zonas permanentemente ocupadas por el hielo? ¿Cuál es la razón de la baja fertilidad de los suelos de zonas tropicales?

La topografía (**pendiente**) condiciona la estabilidad de los materiales y define las zonas más predisuestas a desarrollar procesos de erosión o sedimentación. ¿Puede la orientación de una ladera en latitudes medias influir en el tipo de suelo? ¿En qué lugar del perfil de un torrente se forman los conos de deyección? ¿Por qué muchos taludes de las carreteras se ven afectados por deslizamientos o desprendimientos?

El **tiempo** es un componente importante en la dinámica externa. La duración de los procesos es

un factor muy determinante en la progresión de sus efectos. El paso del tiempo también puede provocar la evolución de otros factores como el cambio de las condiciones climáticas, la modificación de la topografía o de la composición de los materiales geológicos. ¿Por qué las avenidas torrenciales en zonas mediterráneas suelen ser catastróficas? ¿Cuánto tiempo requiere la formación de un suelo? ¿En la dinámica exógena predominan más los procesos uniformes o los catastróficos?

Como ya viene siendo una constante, también aquí se cumple que ninguno de los factores suele actuar aisladamente. Será la acción combinada de todos ellos la que repercutirá en todos los procesos.

¿CÓMO CLASIFICAR LOS PROCESOS EXTERNOS? UN ENFOQUE POLIÉDRICO

La forma de abordar el estudio de los procesos externos admite muchos enfoques. Es posible centrar el interés en la dinámica de los agentes. Así, hablamos de “acción geológica” del mar, del viento, de las aguas continentales, del hielo, de los seres vivos o del hombre y clasificamos consecuentemente los procesos como: marinos, eólicos, fluviotorrenciales, glaciares, bióticos o antrópicos. Otras veces, el encuadre otorga el protagonismo al espacio geográfico en el que actúan los agentes. Diferenciamos así, por ejemplo, los procesos litorales, los de vertiente o ladera, los fluviales,...

Otro tratamiento es el que destaca el dominio morfoclimático en el que se desarrollan los procesos. En este caso podemos discriminar entre ambientes glaciares, áridos, tropicales,.... También son comunes las perspectivas que se centran en el papel de la morfogénesis ligada a las litologías. Desde esta visión se distingue, por ejemplo, entre relieves cársticos, graníticos, volcánicos, arcillosos, conglomeráticos,...

Los procesos externos también suponen un riesgo para las personas y las propiedades. Desde esta consideración, también es posible un enfoque que aborde la dinámica externa desde el punto de vista de los procesos activos, diferenciando, por ejemplo entre riesgo de erosión, riesgo de inundación, riesgo de expansividad de arcillas, riesgo de deslizamientos, desprendimientos o avalanchas de nieve,...

Todos los criterios de clasificación son correctos. Los manuales de Geomorfología, Geografía física o los libros de texto ponen el acento en una u otra sistemática o, incluso, plantean descripciones panorámicas en las que, sucesivamente, se abordan los distintos enfoques.

MODELOS Y CICLOS: APROXIMACIONES A UNA REALIDAD COMPLEJA

Del mismo modo que en otras parcelas del conocimiento, la ciencia recurre al uso de modelos para interpretar de realidades complejas. Un **mo-**

delo conceptual es una representación esquemática y simplificada de la realidad, de manera que ésta resulte más comprensible (Chamizo y García, 2010). Los modelos no son la realidad. Constituyen una aproximación abstracta de la misma expresada de forma conceptual, matemática, gráfica,.... El objetivo de un modelo es describir, explicar, controlar y predecir fenómenos, sistemas o procesos. Tal como indica Pascual-Trillo (2013) en su trabajo de este mismo monográfico, “la modelización implica una serie de pasos que van desde la conceptualización preliminar hasta la predicción de su comportamiento en el caso de los sistemas dinámicos”.

En el análisis de los procesos externos, las interacciones son tan intrincadas que hacen imprescindible el uso de modelos. Los **modelos cíclicos** son un tipo especial de representaciones que reducen la realidad a “un conjunto de fases y estadios por los que discurren la materia y los flujos de energía según una sucesión ordenada de transformaciones que conducen a regresar periódicamente a unas condiciones iniciales” (Brusi, 2011). Los modelos cíclicos en la dinámica externa son aproximaciones teóricas muy habituales: el **ciclo del agua**, el ciclo petrogenético, el **ciclo de evolución del relieve**, el ciclo del carbono, el ciclo del nitrógeno, entre otros muchos.

Posiblemente el ciclo del agua o ciclo hidrogeológico, junto con la parte superficial del ciclo de las rocas, sea el modelo por antonomasia de los procesos externos. No hace falta repasar aquí todas sus etapas y flujos pero sí reivindicar la importancia en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra de su tratamiento en profundidad. Especialmente de los estadios y procesos relacionados con el agua subterránea, puesto que, a menudo son los menos conocidos por los estudiantes.

El ciclo de evolución del relieve, cuya expresión más conocida es el denominado “ciclo geográfico” o “ciclo de Davis” (Fig. 4), fue apuntado por William M. Davis en 1889 y formulado por él mismo diez años más tarde (Davis, 1899). El modelo parte de un relieve plano sometido a una elevación que se ve afectado por progresivos estadios erosivos, evolucionando a través de una sucesión de etapas de juventud, madurez y senectud. Un nuevo levantamiento de un relieve senil plano permite el inicio de un nuevo ciclo. La tesis de Davis defendía que la identificación de determinadas morfologías tipo permitía reconocer el estado evolutivo en el que se encuentra un relieve. Aunque el ciclo de Davis debe ser considerado hoy un modelo excesivamente reduccionista que la geomorfología moderna ya ha abandonado, sigue apareciendo en los manuales y los libros de texto. Sin embargo, es justo reconocer que supuso una primera interpretación global de la evolución del relieve. El abandono del ciclo geográfico como modelo generalizable se fundamenta en que éste otorga un protagonismo casi exclusivo a la erosión fluvial (que Davis denominaba “erosión normal”), que no toma en consideración los cambios climáticos, o que no reconoce la extraordinaria influencia de los procesos internos a la luz de la teoría de la tectónica de placas, gestada casi 70 años más tarde.

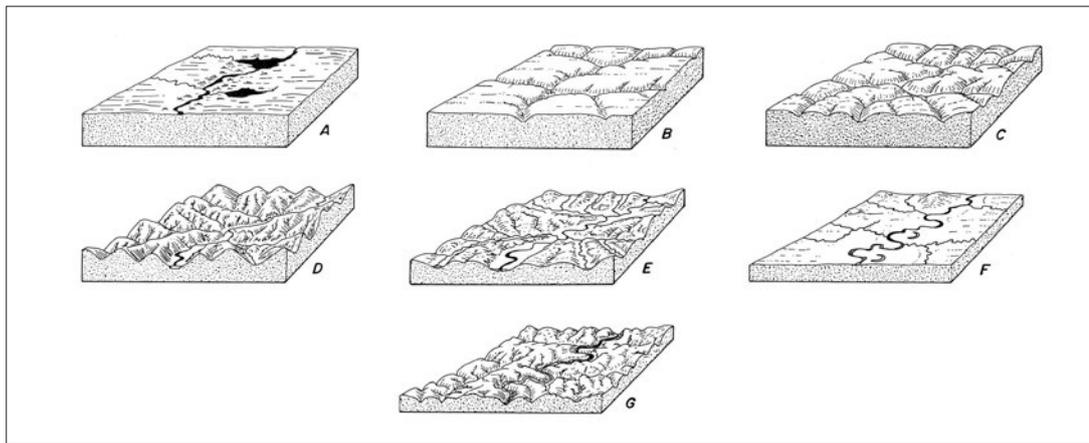


Fig. 4. El “ciclo geográfico” fue un modelo evolutivo propuesto por W. M. Davis en 1889 para explicar la evolución del relieve. Ha sido ilustrado por diversos autores. El diseño más conocido se atribuye a E. Raisz y aparece en Strahler, (1974). LEYENDA: A. En el estado inicial el relieve es insignificante y el drenaje malo. B. Al principio de la juventud los valles fluviales son estrechos y las zonas elevadas extensas y llanas. C. Al final de la juventud, predominan las vertientes de los valles pero aún quedan tierras elevadas horizontales. D. Durante la madurez, la región consiste en numerosos valles y estrechas divisorias. E. Al final de la madurez el relieve se ha suavizado y los valles fluviales son anchos. F. Durante la senectud se origina una penillanura de la que sobresalen algunos monadnocks. G. El levantamiento de la región implica su rejuvenecimiento o segundo ciclo de denudación, representado aquí cuando ha alcanzado ya el comienzo de la madurez.

LA VELOCIDAD DE LOS PROCESOS EXTERNOS

La mayor parte de los procesos tectónicos de creación de relieve actúan a unas velocidades tan lentas que escapan a la percepción humana en los órdenes de magnitud cotidianos. Los procesos externos, en cambio, son mucho más rápidos. Muchos de sus efectos son claramente apreciables por las personas o por los registros históricos recientes.

El libro “El mundo sin nosotros” (*The World Without Us*) publicado en 2007 por el periodista estadounidense Alan Weisman desarrolla las ideas del artículo “Earth Without People” que él mismo había publicado en 2005 en la revista *Discover*. Su ensayo plantea el ejercicio de ficción de como evolucionaría el mundo si desapareciera la especie humana. La originalidad de este planteamiento se ha visto reflejada en diversas producciones documentales de gran interés didáctico (Fig. 5) que ahondan en los efectos de nuestra desaparición a corto, medio y largo plazo⁷.

Las evidencias del cambio recogidas por todo el planeta y las entrevistas a expertos han permitido a Weisman retratar un escenario apocalíptico en el que, fundamentalmente, los procesos externos borrarían las huellas más patentes de nuestra civilización en menos de 500 años. Las construcciones se desmoronarían, las obras de ingeniería sucumbirían a la falta de mantenimiento, las ciudades serían ocupadas por la vegetación y la fauna salvaje,... Muy pocos objetos, productos y realizaciones antrópicas escaparían a la degradación. La comparación con los procesos internos es obligada. En ese mismo lapso de tiempo el Atlántico se

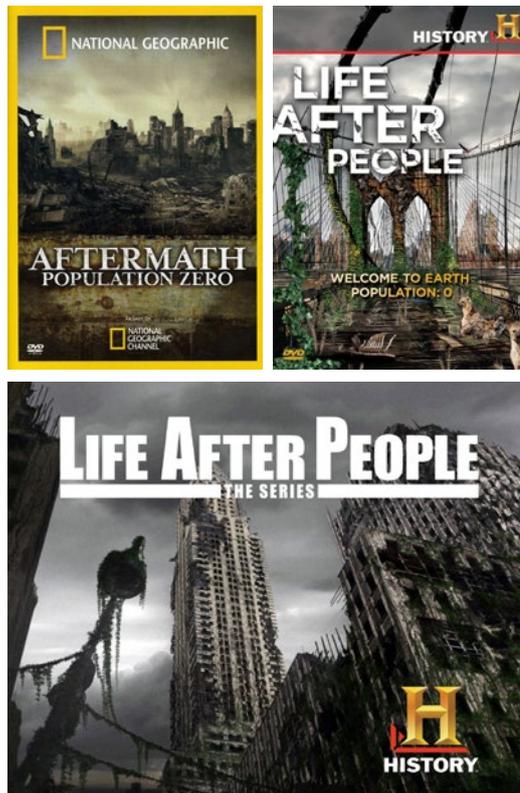
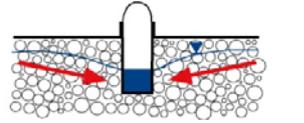
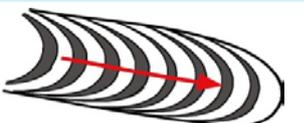
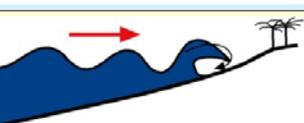
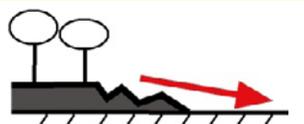
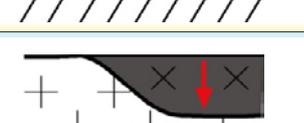
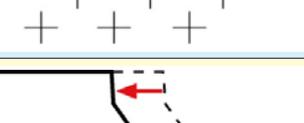
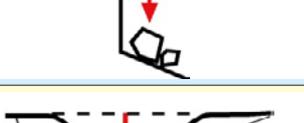


Fig. 5. Diversas producciones documentales y series televisivas desarrollan las ideas de Alan Weisman sobre la rápida transformación de la superficie de la Tierra después de una hipotética desaparición de la especie humana.

habría “abierto” escasamente unos 30 m más a causa de la tectónica de placas. La dinámica externa actúa a velocidades relativamente rápidas y fácilmente perceptibles.

Las velocidades de los procesos externos son más aceleradas pero, no por ello, sus órdenes de magnitud son conocidos por la mayoría de los ciudadanos. Aunque sean tan solo aproximaciones, resulta útil analizar las velocidades medias de algunos procesos y fenómenos (Tabla III) y los factores que influyen en ellas.

⁷ Por ejemplo: *La Tierra sin humanos*, miniserie de dos episodios del History Channel; *Aftermath: Population Zero*, del National Geographic Channel; o *El futuro es salvaje*, serie producida por Discovery Channel y más específicamente centrada en la evolución biológica futura.

Velocidad media de:		Orden de magnitud	Depende de...
Corrientes fluviales		0.01 cm/s a 1,5 – 3 m/s ♦	Pendiente, caudal, geometría del cauce, rugosidad del lecho
Aguas subterráneas en acuíferos detríticos		0.0001 i 10 m/día	Gradiente hidráulico, permeabilidad, porosidad
Flujos glaciares		3 – 300 m/año ☼ Max: 1 – 2 km/año	Variaciones de la precipitación, fricción basal o en los márgenes, presencia de agua subglaciar
Olas		23,1 cm/s – 36 m/s *	Longitud de onda, profundidad
Olas de tsunami		500 – 800 km/h △	Profundidad lámina de agua
Erosión del suelo		61 mm/1000 años ☼	Presencia de vegetación, precipitación, litología,...
Meteorización química en zonas tropicales		2 – 50 mm/1000 años ◀	Clima, litología, estructura
Retroceso de escarpes		0,5 – 10,5 mm/año *	Precipitación, litología, vegetación,...
Deslizamientos/ Desprendimientos: Rápidos-catastróficos Lentos		5 – 50 m/s 0,1 – 5 m/100 años	Pendiente, precipitaciones, ángulo de estabilidad del material, litología, estructura,...
Erosión cárstica: en calizas y carbonatos en yesos en sales (halita) y flujo turbulento		0,1 – 1 mm/año ♦ 1 – 10 mm/año 1, 2 cm /minuto	Litología, precipitaciones, temperatura,...
Crecimiento de espeleotemas		0,002 – 0,36 mm/año ❖	Clima, precipitaciones, temperatura,...

♦ Sunborg (1956)

△ Davidson-Arnott (2010)

☼ Gaillardet (2004)

◀ Thomas (1994), en ☼

♦ Gutiérrez, F. (2010)

* <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/watwav2.html>

☼ Gutiérrez-Elorza, 2008

❖ Ford y Williams (1989) en ☼

□ Gombert (1995), en ☼

Tabla III. Velocidades de algunos procesos externos (se indican a pie de la tabla las fuentes bibliográficas de referencia)

INVESTIGANDO LOS PROCESOS EXTERNOS EN EL SIGLO XXI

La descripción cualitativa de los procesos externos ha variado muy poco en los últimos cien años. Los modelos explicativos de la acción geológica de los agentes, del modelado del relieve, de la génesis edáfica,... constituyen interpretaciones sólidas, coherentes y bien fundamentadas en observaciones. En la segunda mitad del siglo XX, un conjunto de autores (Tricart, Birot, Cailleux,...) destacaron por abordar de un modo integrado los procesos y sus expresiones geomorfológicas, poniendo un fuerte acento en una metodología de análisis descriptivo. Desde una línea complementaria, otros científicos (Horton, Strahler, Schumm, Leopold,...) se significaron por un planteamiento más cuantitativo basado en un análisis geométrico del relieve y en un enfoque estadístico y experimental de los procesos. Estas dos perspectivas se han plasmado en numerosos tratados, teorías y metodologías de estudio que quedan reflejadas en el abordaje actual de los procesos en entornos educativos.

No obstante, algo ha cambiado en la geodinámica externa en las últimas décadas. Los avances científicos y tecnológicos han contribuido a mejorar las herramientas con las que se acometen los problemas. Tanto los enfoques más descriptivos como los más cuantitativos se han beneficiado de un sinnúmero de recursos que permiten obtener resultados más precisos y alcanzar unas conclusiones más globalizadoras. Es importante tomar conciencia de esta revolución y acercarse al conocimiento de estas nuevas tendencias a nuestras aulas. Veamos algunas.

- *La cartografía y las imágenes de satélite.* La irrupción de los Sistemas de Información Geográfica, el tratamiento de datos georeferenciados a partir de GPS, y la facilidad de adquisición de imágenes de satélite, han revolucionado la cartografía de procesos externos. Hoy en día, la posibilidad de ver imágenes en 3D de la superficie de cualquier lugar de la Tierra está a disposición de cualquiera que tenga un ordenador y conexión a internet.
- *Las técnicas geocronológicas.* Actualmente existe la posibilidad de situar en un contexto cronológico muy preciso los depósitos sedimentarios derivados de procesos erosivos a partir de múltiples técnicas de datación (^{14}C , OSL, ...) a partir de cantidades ínfimas de material. Incluso, se puede llegar a datar el tiempo de exposición de superficies generadas por erosión a partir de núcleos cosmogénicos. Esto permite por un lado cuantificar la velocidad de algunos procesos extremadamente lentos y, por otro, establecer relaciones entre procesos y paleoclimas.
- *Los modelos matemáticos.* La cuantificación de los procesos ha sido, por sí misma y desde su inicio como disciplina científica, una finalidad de la geodinámica externa. Todos los procesos mencionados pueden expresarse de forma matemática, desde planteamientos simples a complejas ecuaciones diferenciales. La potencia de cálculo de los ordenadores y la creación de programas basados en modelos numéricos ha facilitado en

gran medida la capacidad de simular con éxito los procesos externos observados en el campo y prever su acción futura con el objetivo de predecir y prevenir daños (inundaciones, deslizamientos) o evaluar su desarrollo en escenarios cambiantes.

LOS PROCESOS EXTERNOS EN LA ENSEÑANZA

Directrices curriculares

Los procesos externos siempre han tenido un lugar en los temarios. En el sistema educativo español, su importancia ha sido reconocida por una presencia destacada en los currículos de Primaria, Secundaria y Bachillerato. Esta afirmación puede hacerse extensiva a la práctica totalidad de sistemas educativos. En las directrices curriculares estatales⁸ vigentes en España los procesos externos aparecen recurrentemente en los tres niveles de Enseñanza.

En Primaria, se sitúan en la materia **Conocimiento del Medio**, con una especial insistencia en que el conjunto de fenómenos constituyen el escenario de la existencia humana. Se abordan: la percepción de las variables del tiempo atmosférico y el clima, el reconocimiento del suelo, la comprensión del ciclo del agua, la descripción de los elementos que conforman el relieve y el paisaje, la representación cartográfica, entre otros aspectos.

En educación Secundaria, los procesos externos aparecen tanto en las ciencias Naturales (**Biología y Geología**) como en **Geografía e Historia**. Desde el enfoque de ciencias se plantea tratar el modelado del relieve terrestre, la desigualdad energética terrestre, la meteorización, erosión, transporte y sedimentación, los factores externos del modelado del relieve y los sistemas morfoclimáticos. También se analizan los agentes geológicos externos y su acción geológica, así como las aguas encauzadas y las aguas subterráneas. Desde la Geografía se centra el interés en los aspectos cartográficos pero también se apuntan contenidos sobre el relieve terrestre –también de las placas tectónicas–, el tiempo y el clima o los riesgos naturales.

En Bachillerato, los procesos externos son tratados muy colateralmente en la asignatura común de **Ciencias para el mundo contemporáneo**. En ella se habla de las interacciones y se aborda la sobreexplotación de los recursos naturales, los riesgos y los impactos. En la materia **Biología y Geología**, de la modalidad de Ciencias y Tecnología, se incluye un bloque de contenidos sobre Geodinámica externa que desarrolla el modelado del relieve, los procesos

⁸ *Primaria: ORDEN ECI/2211/2007, de 12 de julio, por la que se establece el currículo y se regula la ordenación de la Educación primaria. (BOE 173 de 20 de julio de 2007); Secundaria: REAL DECRETO 116/2004, de 23 de enero, por el que se desarrolla la ordenación y se establece el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria (BOE 35 de 10 de febrero de 2004); Bachillerato: ORDEN ESD/1729/2008, de 11 de junio, por la que se regula la ordenación y se establece el currículo del bachillerato (BOE 147 de 18 de junio de 2008). Todas estas directrices están pendientes de revisión en el marco de la LOMCE.*

exógenos y su relación con los ambientes sedimentarios, los riesgos geológicos, la meteorización y el suelo. También se remarca la importancia de las nuevas tecnologías en la investigación del entorno (SIG, GPS, teledetección,...). En la asignatura de **Ciencias de la Tierra y medioambientales** se dedica un bloque a los sistemas fluidos externos y su dinámica. Se describen la hidrosfera, las masas de agua, el balance hídrico y el ciclo del agua. También se destina un apartado a tratar los sistemas de ladera, los sistemas fluviales y los riesgos asociados. Se enfoca el origen del relieve como resultado de la interacción entre la dinámica interna y la dinámica externa de la Tierra. Se analizan los ciclos biogeoquímicos del oxígeno, el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre y se apuntan dos ejemplos de interfases: el suelo y el sistema litoral. Ya a nivel más anecdótico, algunos conceptos relacionados con los procesos externos están presentes en la materia de **Geografía**, de la modalidad de Humanidades y Ciencias Sociales. En concreto se apunta el tratamiento del “medio natural español: diversidad geológica, morfológica, climática, vegetativa [sic] e hídrica”. También se abordan los recursos hídricos: el problema del agua y la interacción naturaleza/sociedad en la configuración y transformación de los espacios geográficos.

Luces y sombras de los procesos externos en la enseñanza

Nadie puede poner en duda que los procesos externos están presentes en la enseñanza. Su abordaje puede apoyarse en algunos puntos fuertes que facilitan su aprendizaje:

Simplicidad

Un primer factor favorable, es que su tratamiento es asequible por la simplicidad de la mayor parte de sus contenidos. El carácter fundamentalmente descriptivo de la dinámica externa hace relativamente sencillo su estudio y permite una secuenciación de los conceptos en una progresión de menor a mayor dificultad a lo largo de los distintos niveles educativos. Es cierto, tal como apunta Pedrinaci (2001), que la complejidad de determinados conocimientos geológicos entorpece su comprensión puesto que acarrea obstáculos epistemológicos y choca con las ideas previas de los estudiantes. Esta afirmación es muy acertada para aspectos como la tectónica de placas, el origen de los fósiles, o el origen de las rocas. No obstante, en los procesos externos, las ideas básicas sobre la erosión, la sedimentación, o el ciclo del agua permiten interpretaciones relativamente sencillas. La historia de la ciencia corrobora esta apreciación puesto que la mayor parte de las explicaciones de la dinámica externa existentes hace ya algunos siglos siguen vigentes hoy en día.

Proximidad

Un segundo factor que facilita el aprendizaje de los procesos externos es su omnipresencia y proximidad. El medio físico, el paisaje, el suelo y los fenómenos naturales que percibimos directamente a través de nuestros sentidos nos resultan familiares. También los conocemos a través de imágenes reales en fotografías, documentales, cine,... Antes

de abordar su estudio, nuestro cerebro ya ha conformado una idea aproximada de lo que es un río, un acantilado, una playa, o una cueva. Algo muy distinto sucede con otros conceptos geológicos más alejados de esta cotidianeidad como pueden ser la cristalización de un magma, las rocas metamórficas o la estructura interna de la Tierra.

Concreción

Además de su cercanía, los procesos exógenos son mucho más tangibles y su interpretación establece una sólida correspondencia con la realidad observada. La conceptualización de la dinámica externa no requiere de la abstracción que entrañan otras ideas geológicas como la existencia de zonas de subducción, las redes de Bravais o la diagénesis. A esta concreción contribuye en gran medida el hecho que muchos de sus efectos pueden observarse en la naturaleza a unas escalas de espacio y tiempo cercanas a nosotros.

Reproductibilidad

Muchos procesos externos permiten ser abordados mediante la reproductibilidad de los fenómenos. Las escalas espaciotemporales antes citadas facilitan la experimentación. Ya sea en el campo o en el laboratorio resulta factible plantear observaciones sobre dinámica fluvial, erosión, sedimentación,... Algunas de estas experiencias, y modelos analógicos pueden ser consultadas en el portal web Earthlearningidea⁹ (King et al., 2009 y King y Kenneth, 2010).

En el plato opuesto de la balanza, el aprendizaje de los procesos externos también presenta ciertas dificultades o desafíos que es preciso considerar en el ejercicio docente. Apuntamos, a modo de ejemplo, algunas de ellas:

Complejidad terminológica

“Las ciencias se expresan en lenguajes específicos, sumamente eficaces porque contienen mucha información...” (Izquierdo, 1996). Esta afirmación es abrumadoramente cierta para la dinámica externa. ¿Qué es un pingo? ¿Y un ventifacto? ¿Y el nivel piezométrico? Una consulta rápida a la versión *on line* del Diccionario de Geología (Riba, 1997) permite constatar que los términos específicos de la Geomorfología (unos 4.400) constituyen un porcentaje muy elevado del vocabulario de las Ciencias de la Tierra. Si añadimos los conceptos del lenguaje común (2.175), fundamentalmente referidos a elementos del paisaje, el agua y los vocablos relacionados con los sedimentos y rocas sedimentarias (2.662) nos podemos dar cuenta de la complejidad que representa conocer un léxico tan amplio. Aunque, como es lógico, no es preciso conocer el significado de todas las palabras, es evidente que esta extensión representa un reto para su aprendizaje.

Escaso protagonismo

La Teoría de la Tectónica de placas constituye, indudablemente, un marco general integrador para explicar la evolución de la litosfera y de las grandes

⁹ http://www.earthlearningidea.com/Indices/contents_Spanish.html

unidades de relieve de nuestro planeta. También, por supuesto, es capaz de ofrecer un modelo interpretativo de otros muchos procesos: sismicidad, vulcanismo, distribución de rocas y estructuras,... El reconocimiento de su importancia llega incluso a explicitarse en las directrices curriculares del ministerio cuando, para la asignatura de Biología y Geología, se subraya que debe abordarse “la dinámica terrestre, haciendo énfasis en el paradigma de la tectónica global”. Nada se dice de la dinámica exógena. Los procesos externos son percibidos a menudo como un tema de menor significación. Reivindicamos desde estas líneas su interés y trascendencia para comprender también el funcionamiento integral de la Tierra. En pleno siglo XXI, la comprensión de los procesos externos por parte de los estudiantes aporta también un conocimiento imprescindible para valorar como ciudadanos una larga lista de problemas de actualidad: acceso al agua, cambio climático, ordenación territorial, uso del suelo, desertización, explotación de los recursos,...

Enfoque riguroso, sistémico y cuantitativo

Desde una perspectiva análoga, y en plena coincidencia con la orientación requerida para los procesos internos en este mismo monográfico (Alfaro *et al.*, 2013), el tratamiento de la dinámica externa debe sustentarse también en un enfoque sistémico. La dinámica de nuestro planeta debe explicarse a través de las continuas interacciones entre la geosfera, hidrosfera, atmósfera, biosfera y antroposfera. La enseñanza de los procesos externos debe superar también el encuadre únicamente descriptivo y perseguir un análisis más profundo. Su aprendizaje debe incorporar la cuantificación, la representación cartográfica, la modelización y la relevancia científica, económica, territorial, ambiental,...

Una propuesta didáctica: Las preguntas clave sobre procesos externos

La extensión de este trabajo no permite desarrollar un apartado de recursos didácticos específicos de este tema. Se han apuntado algunos en el texto y resulta relativamente fácil encontrar ideas y materiales: recursos en la red, vídeos, maquetas, documentales, imágenes, actividades de investigación, cartografías,...

Sugerimos, a modo de corolario, un simple cuestionario que es aplicable al estudio de paisajes y fenómenos, ya sea a partir de fotografías (Figs. 6 a 9), noticias de prensa o de la realidad observable en el campo.

¿Cuál es el proceso, fenómeno, forma, evidencia, riesgo?
¿Dónde se encuentra? (situación geográfica)
¿Qué agentes han intervenido?
¿Cómo ha sucedido? ¿Qué acciones se han producido?
¿Qué factores han condicionado el proceso? (clima, litología, estructura,...)
¿Durante cuánto tiempo? ¿Puede datarse?
¿Sigue activo?
¿Puede medirse, cuantificarse? ¿Cómo?
¿Puede representarse cartográficamente?



Fig. 6. Travertinos en formación en el lago de Banyoles (Girona).



Fig. 7. Formas de modelado de las rocas graníticas en Roques Planes (Calonge, Girona).



Fig. 8. Glaciar de Baltoro en la región del Karakórum (note de Paquistán) (foto: Joan Cardona).



Fig. 9. Dolina en Villar del Cobo (Sierra de Albarracín, Teruel).

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, P. (2010). Un modelo para el funcionamiento del interior terrestre y su interacción con la superficie. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 67, 20-27.
- Alfaro, P., Alonso-Chaves, F.M., Fernández, C. y Gutiérrez-Alonso, G. (2013). Tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 168-180.
- Briones, C. (2010). Planeta vivo: el origen y la evolución temprana de la vida en la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1, 25-32.
- Brundsdon, D. (1979). Weathering. En: Emmelton y Thornes (Eds.). *Process in Geomorphology*. Arnold. London, 73-129.
- Brusi, D. (2011). Un planeta interdependiente y complejo. Interacciones entre los subsistemas terrestres. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 67, 28-36.
- Cloud, P. (1981). *El Cosmos, La Tierra y el hombre*. Ed. Alianza Universidad.
- Chamizo, J.A y García, A. (coords.) (2010). *Los modelos en la enseñanza de las ciencias*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press. London. 442 p.
- Davis, W.M. (1899). The Geographical Cycle. *Geogr. J.*, 14, 481-504.
- Ford, D.C. y Williams, P. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman and Hall. London. 601 p.
- Gombert, P. (1995). Approche théorique simplifiée de la dissolution karstique. *Karstologia*, 24, 41-51.
- Gutiérrez, F. (2010). Hazards associated with karst. En: *Geomorphological hazards and disaster prevention* (in Alcántara-Ayala, I. y Goudie, A., Eds.). Cambridge University Press. London. 161-175.
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson. 898 p.
- Hooke, R., LeB. (2000). On the history of humans as geomorphic agents. *Geology*, 28, 843-846.
- Izquierdo, M. (1996). Reflexiones sobre el lenguaje científico: algunos ejemplos de Geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 4.3, 167-171.
- King, C.; Kennett, P.; Devon, E. y Sellés-Martínez, J. (2009). Earthlearningidea: nuevos recursos para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra en todo el mundo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 17.1, 2-15.
- King, C. y Kennett, P. (2010). "Darwin Geólogo": una selección de actividades de Earthlearningidea y Earth Science Education Unit. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.1, 2-15.
- Martín-Chivelet, J. (2010). Ciclo del carbono y clima. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1, 33-46.
- Mediavilla, M.J. (2010). Origen y evolución del oxígeno atmosférico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1, 16-24.
- Pascual Trillo, J.A. (2013). La Tierra como sistema. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 130-138.
- Pedraza, J. de (1996). *Geomorfología*. Editorial Rueda. Madrid. 414 p.
- Pedrinaci, E. (2001). *Los procesos geológicos internos*. Editorial Síntesis. 222 p.
- Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G.R., Barrera, J.L., Belmonte, A., Brusi, D., Calonge, A., Cardona, V., Crespo-Blanc, A., Feixas, J.C., Fernández-Martínez, E., González-Díez, A., Jiménez-Millán, J., López-Ruiz, J., Mata-Perelló, J.M., Pascual, J.A., Quintanilla, L., Rábano, I., Rebollo, L., Rodrigo, A. y Roquero, E. (2013). Alfabetización en ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 117-129.
- Riba, O. (Dir.) (1997). *Diccionari de Geologia*. Institut d'Estudis Catalans. Enciclopèdia Catalana. 1407. p.
- Strahler, A.N. (1974). *Physical Geography*. John Wiley & sons, inc. 765 p.
- Summerfield, M.A. (1991). *Global Geomorphology*. Longman y John Wiley & Sons, London y New York. 537 p.
- Sunborg, A. (1956). The river Klarälven, a study of fluvial processes. *Geografiska Annaler*, 38, 127-316.
- Thomas, M.F. (1994). *Geomorphology in the Tropics. A study of Weathering and Denudation in Low Latitudes*. Wiley. Chichester. 460 p.
- Vidal-Romaní, J.R. y Twidale, C.R. (1999). Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. *Geomorphology* 31, 13-27.
- Weisman, A. (2007). *El mundo sin nosotros*. Debate, 432 p.
- Wilkinson, B. H. (2005). Humans as geologic agents: a deep-time perspective. *Geology* 33, 161-164. ■

Fecha de recepción del original: 28/07/2013

Fecha de aceptación definitiva: 24/09/2013