

La Tierra como sistema

Earth as a System

JOSÉ ANTONIO PASCUAL TRILLO

Departamento de Biología y Geología. IES El Escorial. El Escorial (Madrid). jose.antonio.pascual.trillo@gmail.com

Resumen La aplicación del enfoque de sistemas a la Tierra ofrece una visión global de nuestro planeta esencial a la par que complementaria del análisis reduccionista tradicional. La Tierra como sistema exige una mirada educativa a la estructura del planeta y su dinámica evolutiva desde una perspectiva holística, en la que encajarán los otros contenidos específicos. Constituye, pues, una de las ideas claves en la formación científica básica que debe recibir cualquier ciudadano en su enseñanza obligatoria.

Palabras clave: Tierra, sistema, educación, alfabetización científica.

Abstract *The systems approach to the Earth provides a global view of our planet. It is an essential contribution. It is also complementary to the traditional reductionist analysis. The Earth as a system requires an educational look at the structure of the planet and its evolutionary dynamics from a holistic perspective. Other specific contents will fit into this frame. It is thus one of the key concepts in basic science education that any citizen should receive during their compulsory education.*

Keywords: *Earth, system, education, scientific literacy.*

INTRODUCCIÓN

Este artículo está escrito para profesores y personas interesadas en la enseñanza de las ciencias de la Tierra, particularmente en la etapa de la educación secundaria, pero no solo. Se centra en la reflexión sobre las nociones teóricas que sustentan los conceptos básicos tratados en el documento “Alfabetización en ciencias de la Tierra” (Pedrinaci et al., 2013) y particularmente con relación a la idea clave 1: “La Tierra es un sistema complejo en el que interactúan las rocas, el agua, el aire y la vida”, presentando también algunas ideas y sugerencias sobre la manera en que podrían ser adaptados a la práctica docente. Por ello, al final de cada apartado, tras la argumentación teórica básica que constituye la parte fundamental del texto, se incluye un breve comentario sobre lo que tales elementos teóricos pueden ofrecer en el ámbito concreto de la enseñanza secundaria obligatoria, es decir, sobre cómo afectan a la alfabetización científica básica.

La estructura del artículo sigue el siguiente esquema lógico: inicialmente se presentan los fundamentos generales de la teoría y el enfoque de sistemas para, a continuación, realizar una primera aproximación a la Tierra desde la aplicación de la visión sistémica. Luego se introduce brevemente la estructura funcional y la dinámica temporal que caracteriza al sistema y, finalmente, se aborda la interacción entre éste y el subsistema que representa

la humanidad y su economía. El artículo concluye con unas reflexiones acerca del sentido de este planteamiento sistémico en el marco de una cultura científica básica. En diversos lugares se incluyen referencias a los diferentes apartados que desarrollan la idea clave 1 comentada.

TEORÍA Y ENFOQUE DE SISTEMAS

La mayor parte de la aventura científica iniciada en la Ilustración ha seguido el derrotero marcado por el método cartesiano, consistente en dividir los problemas en cuestiones más simples o reducir la realidad a partes componentes más abordables. Esta es la base de un potente proceso de conocimiento científico, lógico y racional que se ha denominado método analítico-reduccionista y que en ocasiones ha pasado por ser el único método científico válido.

Sin embargo, no todas las ciencias han logrado aplicar este método con el mismo éxito. En cabeza siempre se situó la física (o, al menos, la física clásica), seguida de la química. La geología y las ciencias de la Tierra lo experimentaron con más éxito en unos ámbitos que en otros, lo mismo que le sucede a la biología, alguno de cuyos campos encuentra serias dificultades para la aplicación estricta de este planteamiento metodológico, por lo que al-



gunos autores han llegado a hablar de la “envidia de la física” (Margulis, 1996; Lewontin, 2000). En el ámbito de las ciencias sociales -desde la psicología a la economía-, el reduccionismo analítico, con su estricta formalización matemática y una alta capacidad predictiva, siempre se topó con notorias dificultades de aplicación.

¿Qué ocurre en estas ciencias? La respuesta la dio un biólogo teórico vienés llamado Ludwig von Bertalanffy: primero en torno a los años treinta y luego en 1968 (la Segunda Guerra Mundial impuso un lamentable paréntesis). Ocurre que el ámbito de estudio por el que se interesan estas ciencias es esencialmente complejo y en el entorno de la complejidad, el reduccionismo se topa con importantes dificultades para su aplicación y la obtención de conclusiones. En cualquier caso, el punto de partida de Bertalanffy no era nuevo desde el punto de vista filosófico, pues remite a la conocida frase “*el todo es más que la suma de las partes*”, de orígenes discutidos, aunque ciertamente remotos (Aristóteles, Heráclito)³. Bertalanffy actualizó y reelaboró formalmente esa idea de que las características constitutivas no son explicables a partir de las características de las partes aisladas. Uno de los aspectos cruciales de la concepción de Bertalanffy es la existencia en el “todo”, respecto a sus partes aisladas, de unas características nuevas o “emergentes”. Así, cuando se descompone una unidad, esas propiedades emergentes no pueden estudiarse, al desaparecer por no estar presentes en las partes. En nuestros textos escolares esta idea aparece recogida, sobre todo en biología, en los apartados que versan sobre los niveles de organización de la materia (Fig. 1).

Como solución al problema, Bertalanffy sugirió desarrollar el concepto de sistema y, en torno a él, propone una teoría general de sistemas cuya finalidad es “*la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los sistemas en general*” (Bertalanffy, 1968). El sistema es definido como un complejo de elementos interactuantes, estando el hincapié innovador en la importancia concedida a dichas interacciones por encima de las que se conceden a las características específicas de cada elemento. Se cambia así la perspectiva o enfoque, dirigiendo el interés hacia la estructura y el comportamiento del sistema, que determinan su

evolución en el tiempo. Los modelos formales de los sistemas son, así y por lo general, dinámicos y su campo de modelado y simulación constituye la “*dinámica de sistemas*” (ver por ejemplo: Aracil y Gordillo, 1997).

Aplicaciones en la enseñanza

El enfoque sistémico tiene un interesante uso didáctico en la enseñanza como metodología transdisciplinaria que persigue una perspectiva global. La sugerente idea del “macroscopio”, propuesta por Joel de Rosnay (1977), identifica este enfoque con un hipotético instrumento que, al contrario que el microscopio, facultaría al observador para la observación de las totalidades.

En las ciencias de la Tierra, ideas como la representada en el ciclo del agua, diagramas como los que se utilizan habitualmente en la tectónica global, dibujos como los que expresan la circulación atmosférica general o la misma imagen de la Tierra vista desde el espacio (Fig. 2), se sitúan en esa línea de la percepción sistémica. También la descomposición inicial del sistema Tierra en subsistemas conceptuales del tipo de la geosfera, la atmósfera, la hidrosfera o la biosfera, que se trabajan desde los primeros cursos de la ESO, pertenecen a un enfoque de tipo sistémico. Posteriormente, el fraccionamiento disciplinario del objeto de estudio (la realidad natural o material, en el caso de las ciencias naturales) hace que se pierda en cierto grado la idea de globalidad para avanzar en la comprensión detallada del contenido seleccionado; pero conviene no olvidar que la realidad cuya comprensión se busca sigue siendo una, constituida por la interacción habitualmente sinérgica (por tanto, no coincidente con la suma) de los contenidos objeto de cada uno de los diferentes ámbitos disciplinares de estudio. Esto debe ser tenido particularmente presente a la hora de analizar aquellos objetivos educativos que tienen que ver con la formación cultural global de la per-

Fig. 1. Los niveles de organización de la materia suponen una clasificación jerarquizada. En la imagen: niveles de organización de la materia relacionada con la vida, desde el átomo al ecosistema. Puede advertirse la existencia de propiedades emergentes que se presentan solo a partir de cierto nivel. Por ejemplo: la propiedad que llamamos vida solo aparece a partir del nivel de organización de la célula, de acuerdo con la teoría celular.

³ En realidad, el asunto es bastante más complejo, puesto que tanto desde la vertiente del reduccionismo como desde la del holismo (su extremo opuesto, en el término acuñado por el filósofo y político sudafricano Jan Smuts, que suscita esa idea de que el todo supera la suma de las partes) existen diversas acepciones: metodológicas, epistemológicas, lógicas, ontológicas, etc.; cada una con sus matices y particularidades.



Fig. 2. El informe de la Comisión Brundtland (CMMAD, 1988) iniciaba su recapitulación advirtiendo sobre la importancia histórica de la imagen de la Tierra vista desde el espacio, cuya repercusión sobre la forma de vernos a nosotros mismos comparaba con la revolución copernicana del siglo XVI, algo que la actual familiaridad con la que miramos las imágenes satelitales no debería hacernos olvidar. Imagen de la Tierra facilitada por la NASA.

Fig. 3. Desde el punto de vista de los modelos de caja negra (que atienden solo a las relaciones del sistema con el entorno), la Tierra se comporta como un sistema cerrado, lo que significa que deja entrar y salir energía (de diferente tipo), pero no materia, que circula por su interior en ciclos sin intercambio relevante con el exterior, al menos en la actualidad.

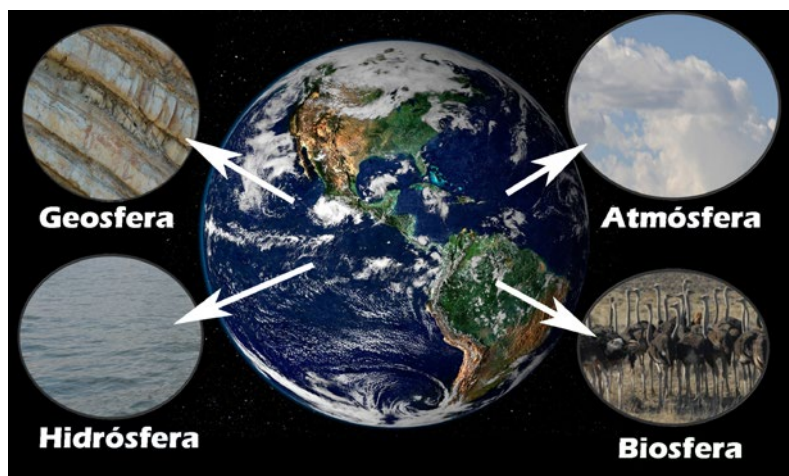


sona y quizás algo menos en muchos de aquellos que se centran en la capacitación para el desarrollo de una profesión concreta. Por ello, resulta fundamental que a la hora de la especialización académica y profesional se posea ya una cierta capacidad perceptiva global que permita integrar en ella los conocimientos específicos por desarrollar.

PRIMERA APROXIMACIÓN AL SISTEMA TIERRA

Un sistema debe ser definido identificando previamente sus límites, ya sean físicos o conceptuales. Esto posibilita diferenciar los elementos que forman parte del sistema de aquellos que resultarán externos. En el caso de la Tierra globalmente considerada, la identificación de los límites es claramente física, considerándose elementos del sistema la materia o la energía que forman parte de esa unidad física que finaliza allá donde queda la última molécula de hidrógeno que permanece atrapada gravitatoriamente por el planeta. El sistema Tierra así definido⁴ resulta ser de carácter básicamente cerrado, entendiéndose por tal el que intercambia energía con el exterior (tanto de

Fig. 4. Los cuatro subsistemas en que se suele dividir la Tierra suponen un comienzo en la aplicación de modelos de caja gris (analizar en un primer paso el interior de un sistema). Sin embargo, no debe olvidarse que los subsistemas interactúan y que el estudio individualizado de cada uno puede hacernos perder parte de esa perspectiva integrada.



4 Idea clave 1.1. del documento "Alfabetización en Ciencias de la Tierra": "La consideración de la Tierra como un sistema ayuda a entender cómo funciona este planeta".

entrada -fundamentalmente radiación solar incidente- como de salida -esencialmente radiación infrarroja-, pero no materia (salvo acontecimientos puntuales como el escape de átomos al espacio o el impacto esporádico de asteroides, fenómenos poco relevantes desde el punto de vista de los flujos de materia (Fig. 3).

Esta simplificación (el carácter cerrado de la Tierra en cuanto al intercambio de materia con el exterior) puede ser revisada tanto al indagar en la evolución histórica del planeta (resulta esencial tener en cuenta el intercambio de materia en forma de entrada de asteroides y escape de gases y otras formas de materia para entender la formación de nuestro planeta o de la Luna -ver Martínez-Frías, 2013 en este volumen- y, en general, para comprender los primeros acontecimientos del eón Hádico) como desde la trascendencia que algunos impactos parecen haber tenido en la dinámica climática del planeta y la evolución de la vida (aunque en este caso es más importante el efecto de perturbación de la estabilidad del sistema Tierra -la consideración de estos procesos desde el punto de vista de la información- que el flujo de materia en sí mismo)⁵.

En los enfoques sistémicos suele ser habitual comenzar el proceso de modelización (mental o formal) diferenciando nítidamente la composición, la estructura y la funcionalidad o dinamismo del sistema. Como es obvio, la composición es importante, pero siguiendo los planteamientos sistémicos no constituye el objetivo principal del análisis (al contrario de lo que ocurre en los enfoques reduccionistas). Este se centra en las interacciones. Para ello hay que identificar la estructura del sistema, es decir, la forma en la que los elementos del sistema se relacionan⁶. De la estructura del sistema se derivará (o se deducirá) su funcionamiento y la consiguiente evolución del mismo que, en la dinámica de sistemas iniciada por Jay Forrester, constituye el objetivo de la predicción, aplicando para ello técnicas de modelado y simulación.

La compartimentación del sistema Tierra en subsistemas, en un proceso de paso de modelos de tipo caja negra a caja gris, conduce en un primer paso a la identificación de los cuatro sistemas terrestres que antes se comentaron (geosfera, atmósfera, hidrosfera, biosfera: Fig. 4), incorporados ya en los contenidos educativos más básicos⁷. De hecho, aquí surge la primera fase de la diferenciación disciplinaria entre las ciencias de la vida (preocupadas por entender la biosfera) y las ciencias de la Tierra (que se preocupan del resto). Como en toda diferenciación analítica, el principal sacrificio se produce en las fronteras, por lo que es preciso no

5 Idea clave 1.4.: "La Tierra intercambia energía y materia con el resto del Sistema Solar".

6 Idea clave 1.3.: "Todos los procesos de la Tierra son el resultado de los flujos de energía y ciclos de materia dentro y entre los subsistemas terrestres"

7 Idea clave 1.2.: "El sistema Tierra está formado por cuatro subsistemas: geosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera".

perder de vista que la interacción Tierra-vida es un aspecto básico de la realidad a la que accederemos con dificultad, siendo, sin embargo, un punto esencial en la comprensión de nuestro planeta. Surge así la necesidad de conceptualización de una ecosfera o geoecosistema global (que no es necesariamente sinónimo de todos los conceptos de biosfera -un término polisémico-, aunque se asemeja bastante a los que proceden de la propuesta original de Vernadsky (1997)), para no perder de vista el estudio y comprensión de unas interacciones cruciales: es el territorio de una ecología evolutiva integrada con la historia de la Tierra y su geodinámica global (por ejemplo: Pedrinaci y Fernández-Martínez, 2010; Pascual, 2011).

En el caso de la Tierra, la modelización de su estructura y dinámica descansa en dos grandes teorías científicas, que para los seguidores de la terminología del físico y epistemólogo Thomas Kuhn constituyen auténticos paradigmas científicos (o metateorías, según otras denominaciones): una es la teoría de la tectónica global, que explica la estructura composicional y funcional del interior de la Tierra y los desequilibrios energéticos existentes que generan su activo dinamismo interno y sus correspondientes repercusiones externas; y la otra es la aplicación de la dinámica de fluidos y la termodinámica a las dos grandes capas (o subsistemas) fluidas y externas de la Tierra: la atmósfera y la hidrosfera.

Bajo este esquema, más allá de los detalles composicionales de las diferentes capas del interior de la Tierra (núcleo, manto, cortezas: geosfera, al fin) o de las capas fluidas externas (atmósfera e hidrosfera), interesa la disposición espacial y funcional y las interacciones de sus principales elementos componentes. Así, para el caso de la geosfera, el concepto de litosfera (estructural y dinámico) resulta globalmente más explicativo que las variaciones composicionales existentes entre cortezas y manto superior. Por su parte, las diferencias estructurales entre ambas cortezas (derivadas de una distinta composición y de una génesis dinámica diversa) resultan relevantes a la hora de entender -y explicar- sus interacciones (en las zonas de subducción, de colisión continental, etc.) (ver Alfaro et al., 2013, en este volumen). Paralelamente, la estructura de la atmósfera en capas (troposfera, estratosfera,...) constituye un aspecto introductorio básico para la interpretación del sistema gaseoso que nos envuelve y la deducción de su dinámica y funcionamiento (movimientos horizontales y verticales, presencia de límites o “pausas” entre capas, zonas de diferente absorción de las radiaciones solares y de las devueltas por la Tierra, etc.). En concreto, la comprensión dinámica del subsistema atmosférico representado por la troposfera (bastante aislada, tanto material como energéticamente, de la estratosfera) explica casi todos los aspectos funcionales que nos afectan a nivel del suelo (meteorológicos y climáticos), así como de sus efectos e interacciones con otros sistemas (por ejemplo: la meteorización o erosión, en el caso de su interacción con la geosfera; o la difusión de gases y la evaporación, en el caso de la interacción con la hidrosfera).

Aplicaciones en la enseñanza

El Universo permite una fácil aproximación educativa desde la identificación de unos sistemas dentro de otros, como muñecas rusas. Percibir la Tierra como sistema supone entender su pertenencia a un sistema superior (el Sistema Solar) que, a su vez, forma parte de otros (galaxias, universo). Por otra parte, la identificación del sistema Tierra exige, en un primer paso, abordar su estructura general para, a partir de ella, continuar su estudio y comprensión diferenciando los distintos subsistemas identificables y que se refieren al planeta rocoso y su interior, las capas fluidas externas y la vida como fenómeno particular. En cada uno de estos subsistemas, una nueva aplicación del enfoque sistémico conduce a abordar la comprensión de sus respectivas estructuras y dinámicas globales que nos llevarán a la tectónica global y los grandes procesos geológicos relacionados (magmatismo, metamorfismo,...) en el caso de la geosfera; o las dinámicas de la atmósfera y la hidrosfera y sus consecuencias en la definición de climas, el ciclo del agua y otros. De nuevo, la necesidad de no ignorar los espacios frontera y las interacciones se revela en aspectos tan importantes como el ámbito geoclimático y los procesos geológicos externos, por no hablar de la ya comentada interacción entre la geología y la vida (ver Brusi et al, 2013; Fernández-Martínez, 2013 en este volumen).

Desde el punto de vista de la contemplación de la Tierra bajo un modelo de caja negra, se percibe la Tierra como un sistema cerrado (o, si se quiere, cerrado para el intercambio de materia y abierto para el de energía), lo que permite ubicar y entender los mecanismos funcionales básicos, tanto ecológicos como geológicos, del planeta y de la vida.

ESTRUCTURA FUNCIONAL

La construcción de modelos constituye una herramienta básica tanto en el proceso de comprensión como en el de predicción del funcionamiento de los sistemas. El modelado o modelización (construcción y aplicación del modelo) implica una serie de pasos que van desde la conceptualización preliminar hasta la predicción de su comportamiento en el caso de los sistemas dinámicos (Fig. 5). Para modelar sistemas dinámicos, como la Tierra, se requiere el empleo de diagramas causales o de influencias entre variables. Estas pueden ser de diferentes tipos: de nivel, de flujo o auxiliares (pueden incluirse algunas exógenas al sistema). La denominación de las variables procede del llamado

Fig. 5. La modelación o modelización implica la construcción del modelo y su aplicación posterior a fines diversos. En la dinámica de sistemas, la construcción pasa por la elaboración de diagramas causales (en el enfoque de sistemas, el interés es puesto particularmente en las interacciones y relaciones) que permiten una formalización matemática (en ecuaciones diferenciales) capaces de ofrecer escenarios (predicción) para situaciones concretas en procesos de simulación. El modelo debe ser validado exigiendo comprobaciones o reajustes en procesos anteriores en función de los resultados obtenidos.

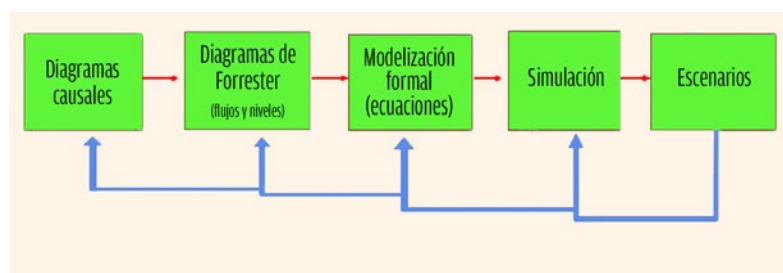
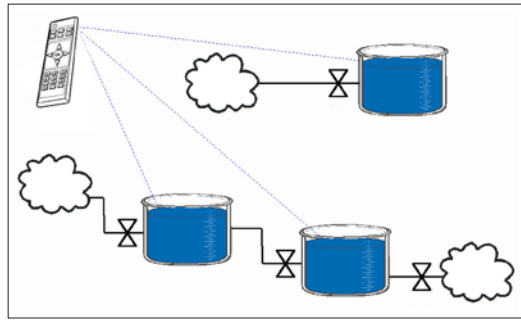


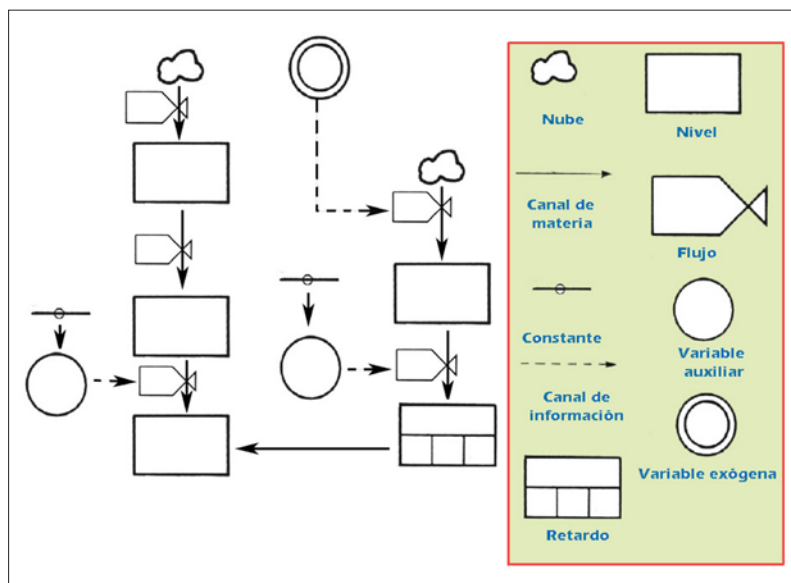
Fig. 6. El símil hidrodinámico de Forrester consiste en identificar las relaciones causales entre las variables con un sistema de conductos, válvulas y depósitos por donde circula el agua, que pueden ser controlados mediante canales de información.



“símil hidrodinámico” (Fig. 6), una metáfora ideada por Forrester que permite representar visualmente las relaciones como canales de flujo entre los diferentes depósitos o *stocks* que constituyen el modelo funcional con el que se trata de representar la realidad (o sistema real) de una manera simplificada. Jay Forrester creó unos iconos para representar las relaciones funcionales y disponerlas en los diagramas que llevan su nombre (Fig. 7), donde se plasman las relaciones causales (de causa-efecto) esenciales (previamente al diagrama de Forrester es preciso construir un mapa causal). Como unidades cibernéticas o de control del funcionamiento del sistema, esas relaciones causales pueden ordenarse en ciclos o bucles de realimentación cuya acción, dependiendo de su signo, puede generar efectos catastróficos (bucles positivos) o estabilizadores (bucles negativos) en la evolución de las variables dependientes. Finalmente, el proceso de modelado implica la formalización matemática en sistemas de ecuaciones diferenciales que posibilitan la simulación (en ocasiones puede realizarse la simulación solo con la identificación de relaciones cualitativas), lo que permitirá la generación de escenarios predictivos (prospectiva).

En el caso de la Tierra, la construcción de modelos interpretativos admite múltiples aplicaciones de acuerdo con los fines perseguidos. Una forma clásica de modelado dinámico es la constituida por los ciclos globales de materiales (Fig. 8) que forman la base de la biogeoquímica (Schlesinger, 2000); siendo frecuentes, en el ámbito educativo

Fig. 7. Los diagramas de Forrester utilizan un código de iconos para representar el funcionamiento del sistema dinámico. Constituye un útil paso entre la identificación de las relaciones que mantienen las variables y la formalización matemática del modelo.



básico, versiones sencillas de los del agua, el carbono, el nitrógeno, el fósforo o el azufre. Este tipo de estrategia modeladora es habitual en ecología y en geoquímica, aportando una visión de tipo sistémico, adaptable a diferentes niveles educativos. En petrología, el ciclo de las rocas, también habitual en los niveles educativos básicos, constituye otro ejemplo de modelado sencillo de un sistema dinámico (Fig. 9).

También es factible expresar diagramas de flujos energéticos, aunque en este caso y en función de las restricciones impuestas por la segunda ley de la termodinámica se tratará de flujos disipativos, como los que configuran los balances energéticos de la atmósfera (Fig. 10), que exigen la consideración de efectos procedentes de otros subsistemas (la geosfera, la biosfera o la hidrosfera) al introducir cambios en muchos de los procesos implicados en el balance.

Menos habitual, aunque no por ello menos interesante, es la consideración de modelos sintéticos elaborados para explicar el activo dinamismo de los relieves terrestres, determinados por los procesos geológicos y climáticos que alimentan las fuentes de energía internas y externas de la Tierra. Aquí es posible considerar como objeto de estudio a la litosfera, quedando las energías internas de la Tierra como variables exógenas (al igual que se hace en el caso de la radiación solar para los procesos externos). Como suele suceder en el análisis de sistemas, la opción adoptada dependerá del interés concreto que tengamos en la complejidad del modelo o en la aplicación de sus resultados, abriéndose así diferentes posibilidades.

La construcción de modelos de dinámica de sistemas exige advertir la existencia de mecanismos reguladores y prever sus consecuencias en el funcionamiento del sistema. En el caso de la Tierra, los modelos de simulación de la tectónica global muestran múltiples interacciones (como, por ejemplo, las relaciones espaciales derivadas de los efectos contrapuestos de la acción de los límites constructivos y destructivos sobre una superficie esférica constante), cuyas consecuencias más evi-

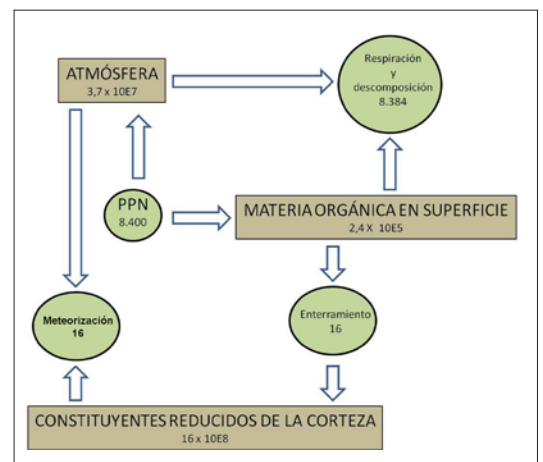


Fig. 8. Ciclo biogeoquímico global del oxígeno (datos expresados en 10^{12} moles por año o equivalentes). PPN es la Producción Primaria Neta. Adaptado de Schlesinger (2000).

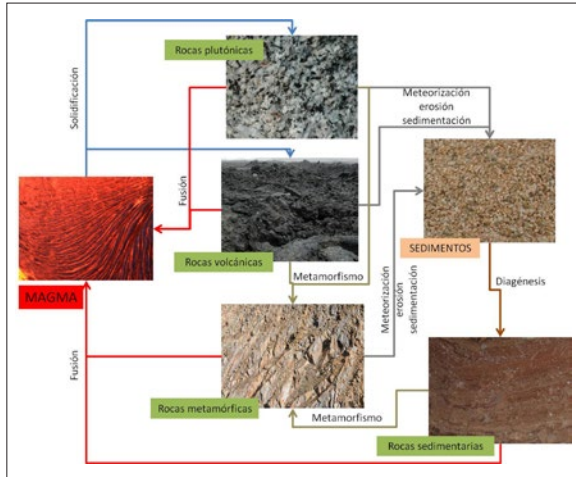


Fig. 9. El ciclo de las rocas constituye otro modelo dinámico en el que se representan los depósitos (rocas y otras formas de almacenamiento de materiales) y los procesos que los relacionan (que adoptan la forma de flujos).

dentos son fácilmente comprensibles (por ejemplo: que la suma total de procesos de colisión y rifting en relación con la destrucción o construcción de la superficie ocupada por la litosfera es prácticamente nula en todo momento; o que la activación de fenómenos subductivos ejercerá algún tipo de realimentación positiva sobre los procesos de tipo rifting, y viceversa).

De la misma manera, los modelos funcionales que simulan los flujos derivados de la energía radiante y explican el balance energético global (también aproximadamente nulo) nos permiten interpretar de una forma sistémica y global el funcionamiento radiativo de la atmósfera, así como simular los efectos de cambios en algunos elementos (como la introducción de “retardos” en el modelo, generados por el incremento de gases de efecto invernadero, con las conocidas consecuencias de calentamiento global y cambio climático (ver, por ejemplo, Mas-Pla y Brusí, 2009)). En la construcción de este tipo de modelos, la intervención de estructuras de realimentación (tanto positivas como negativas) resulta de gran interés funcional e interpretativo (y consecuentemente educativo), por los efectos que ejerce sobre el comportamiento del sistema⁸. Se ha especulado con la existencia de mecanismos homeostáticos globales, es decir, gobernados por bucles de realimentación negativa, no solo para los procesos climáticos, bien conocidos, sino también para el funcionamiento del manto terrestre como gran termostato (Anguita, 1993), por ejemplo. Sobre la existencia de estas estructuras funcionales se elaboró la idea de la homeostasis planetaria que sustenta la teoría Gaia (Margulis y Lovelock, 1974; Lovelock, 1979, 1988; Margulis, 1996), que ha generado tanto expectativas como controversias (ver, por ejemplo, Anguita y Arsuaga, 2000), agitando en cualquier caso el panorama científico de la visión sobre la Tierra.

⁸ Idea clave 1.7.: “El clima es un ejemplo de cómo las interacciones complejas entre los subsistemas terrestres pueden ocasionar cambios impredecibles y significativos”.

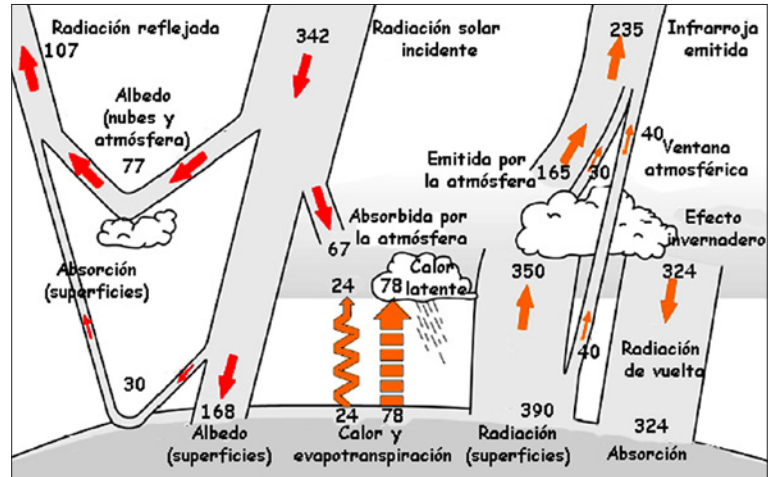


Fig. 10. El balance radiativo o energético atmosférico global implica no solo a la atmósfera sino también a los otros subsistemas (geosfera, hidrosfera, biosfera) capaces de modificarlo mediante cambios en los procesos (albedo, evapotranspiración, etc.). Los valores en la figura son en W/m².

Finalmente, la estructura del sistema Tierra (y la subordinada de sus subsistemas componentes) determina, a ciertas escalas, la aparición de propiedades emergentes. Este es uno de los argumentos fundamentales en la defensa del holismo frente al reduccionismo y, en el caso de la Tierra, no es difícil encontrar algunas de esas propiedades emergentes. La vida, desde luego, es un excelente ejemplo, pero en la Tierra inerte existen otros como los climas (desde la existencia de diferencias locales en el balance energético y el movimiento de las capas fluidas), el volcanismo, la orogénesis o la sismicidad (a partir de las energías internas y las consiguientes corrientes convectivas del manto con sus implicaciones en la superficie).

Aplicaciones en la educación

Los ciclos de materiales, incluyendo el ciclo del agua, son contenidos científicos que, siendo habituales en la enseñanza secundaria, parten de una percepción sistémica y dinámica de la Tierra (ver Ruiz de Almodóvar, 2013, en este volumen). Mediante sencillos diagramas modelan y reproducen un funcionamiento complejo y global que resulta comprensible ya en este nivel. La posibilidad de representación física de los modelos (mediante maquetas, como se hace en museos o exposiciones, particularmente para el caso del agua) demuestra la capacidad didáctica y hasta visual de estos enfoques.

El uso de modelos de balance energético es, sin embargo, considerablemente más complejo que el que presenta el tratamiento de los ciclos de materiales, por cuanto la energía constituye un concepto más difícil de comprender y es vivencialmente menos asequible. No obstante, al menos en los cursos finales de la educación secundaria obligatoria, resulta esencial el abordaje de los flujos de energía con cierto grado de profundidad, tanto desde las fuentes externas como de las internas, para una comprensión adecuada del funcionamiento y la dinámica de la Tierra.

En cuanto a las estructuras funcionales básicas, de carácter cibernético o regulador, la situación es similar a la de la energía, al tratarse de procesos de parecida o aun mayor dificultad cognitiva; aunque, también al igual que en el caso de la energía,

resultan educativamente asequibles en los últimos cursos de la etapa obligatoria bajo estrategias didácticas basadas en el uso de esquemas y ejemplos sencillos. La introducción de la idea esencial de mecanismos de control es, en cualquier caso, fundamental a la hora de comprender el funcionamiento dinámicamente estable de la Tierra y las potenciales consecuencias de su desestabilización (tanto natural como antrópica), por lo que también desde este punto de vista deberían formar parte de esa formación científica común y básica de la etapa educativa obligatoria.

DINÁMICA TEMPORAL

En todo sistema, la estructura configura la función y esta determina una dinámica temporal⁹, es decir, define la evolución del sistema (aunque pueda resultar intrínsecamente caótica e impredecible). En el caso de la Tierra, ocurre exactamente eso: existe una historia de la Tierra en la que está siempre presente la contingencia. Eso hace que las ciencias que la estudian posean historicidad, donde la complejidad y la impredecibilidad tienen mucho que ver con la eventualidad y las consecuencias de la teoría de las catástrofes, pero también con la lógica determinista de un sistema con cierto grado de autoorganización que evoluciona mediante estructuras de control interno.

La geocronología, la cronoestratigrafía, la paleontología y las ciencias que buscan reconstruir los acontecimientos climáticos, geológicos y biológicos que han jalonado los cerca de 4600 millones de años de nuestro planeta poseen una vertiente descriptiva y otra explicativa en la que la visión dinámica de las interacciones entre los sistemas terrestres, dotados de mecanismos de organización y funcionamiento propios a la vez que afectados por la influencia esporádica de variables externas, permite orquestrar una interpretación científica del camino concreto recorrido¹⁰.

Quizás uno de los aspectos más interesantes en la reconstrucción conceptual que hay que hacer en nuestra mente para comprender el planeta tenga que ver con la necesidad de abordar el asunto de la coevolución Tierra-Vida (ver Fernández-Martínez, 2013, en este volumen).

Aplicaciones en la enseñanza

El estudio clásico de la historia de la Tierra, con sus unidades geocronológicas, sus acontecimientos y biotas, constituye un contenido habitual en la etapa obligatoria de la enseñanza. Junto a las necesarias pinceladas descriptivas, la introducción de enfoques explicativos de carácter global o sistémico resultan factibles y útiles para configurar una interpretación de esa historia en

⁹ Idea clave 1.6.: “Los subsistemas de la Tierra son dinámicos.”

¹⁰ Idea clave 1.5.: “Los subsistemas terrestres interactúan en un amplio rango de escalas espaciales y temporales”.

la que intervengan el azar y la necesidad (usando los términos popularizados por Monod, 1970), dando pleno sentido a ambos: el catastrofismo y el uniformismo reconciliados de algún modo. Comprender que la historia de la Tierra se compone de consecuencias y efectos derivados directamente de la lógica del funcionamiento de las estructuras que conforman los sistemas terrestres, sobre los que los acontecimientos catastróficos o caóticos (imprevisibles, a menudo externos al sistema) trazan cambios determinantes en impulsos o episodios singulares, es un objetivo educativo que, correctamente dimensionado, resulta asequible y necesario en el proceso de alfabetización científica de la población

INTERACCIONES ENTRE EL SISTEMA TIERRA Y EL SUBSISTEMA HUMANO

Hoy día resulta imposible entender el funcionamiento del planeta sin contemplar la actividad humana¹¹. El uso de la teoría de sistemas permite también integrar esa actividad desde una perspectiva holística y es precisamente bajo este enfoque donde encuentran su pleno sentido conceptos fundamentales de las nuevas propuestas socioambientales, como ocurre con la sostenibilidad.

La visión sistémica de la interacción Tierra-humanidad lleva a la contemplación de la sociedad humana (sociosistema) como un subsistema integrado dentro del geoeosistema. Dicha integración o dependencia no es solo conceptual, sino también física, ya que el espacio ambiental ocupado por el sistema humano procede del espacio ambiental arrebatado u ocupado (y alterado) al geoeosistema, cualquiera que sea el significado preciso que le demos al término “espacio ambiental” (ver, por ejemplo, Carley y Spapens, 1998; Spangenberg, 2002).

Esta visión resulta contrapuesta a la que habitualmente mantiene la economía neoclásica, en la que la inexistencia de un sistema ambiental identificable hace que este necesite ser tratado como una “externalidad” al sistema económico que, por otra parte, pretende funcionar de manera aparentemente ignorante de las leyes de la termodinámica, como Georgescu-Roegen (1971) ya denunció hace tiempo (Fig. 11).

La visión sistémica Tierra-humanidad facilita la identificación de los tres aspectos clave en la interacción y consecuente generación de problemas ambientales: 1) los flujos de entrada de materia y de energía al subsistema socioeconómico (conocidos como “recursos”), 2) los flujos de salida hacia el geoeosistema (“residuos”), y 3) los efectos de ocupación, alteración y degradación del espacio ambiental apropiado por el subsistema humano. La dependencia de este con respecto al subsistema natural es completa, como refleja

¹¹ Idea clave 1.8.: “La actividad humana está alterando el planeta”

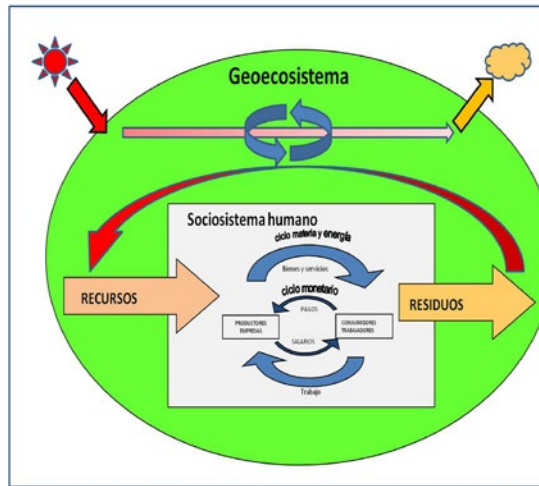
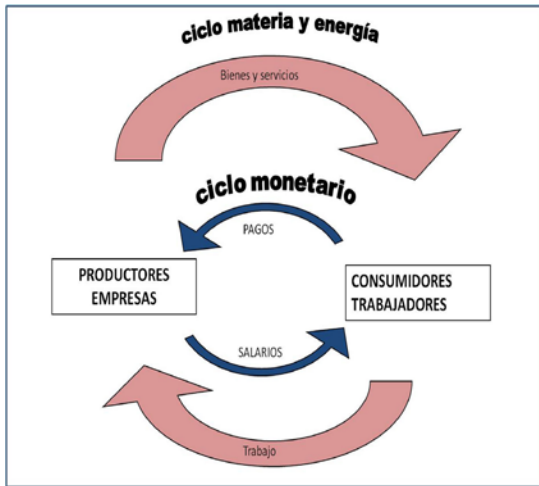


Fig. 11. Dos esquemas contrapuestos. El primero (izquierda) recoge la idea de la economía convencional o neoclásica, con dos ciclos inversos acoplados (uno monetario y otro de bienes y servicios) que giran indefinidamente sin atender a las leyes de la termodinámica y sin un medio ambiente del que dependan o al que alteren. El otro (derecha) recoge el que formula la economía ecológica, en donde el sociosistema humano (la economía) se muestra como un subsistema del geosistema global (que es su medio ambiente) y que para funcionar depende de un flujo de energía externa y un espacio ambiental mínimo (sostenibilidad ecológica).

el esquema de la economía ecológica, por lo que los daños y problemas generados en la estructura y funcionamiento del sistema natural repercutirán a su vez en la calidad de vida y la viabilidad del sistema humano. Es aquí donde encuentra su significado pleno la idea de sostenibilidad, tanto en su vertiente más ambiental o ecológica (derivada de los efectos perniciosos generados en la estructura del geosistema) como en la socioeconómica (disfunciones creadas en la estructura interna del sistema humano, motivadas por efectos externos y por decisiones internas). Existen también dos relaciones de tipo causal -o efectos de un sistema en el otro-, ambas con un carácter habitualmente negativo: los riesgos naturales (efectos del funcionamiento de los procesos naturales en los intereses del sistema humano) y los impactos (efectos de las actividades humanas en la estructura y la función naturales).

Desde el punto de vista de las ciencias de la Tierra (inerte) esta visión permite integrar el tratamiento de los recursos minerales y geológicos en general (Gil y Calvo, 2008), el flujo de residuos hacia los tres sistemas naturales terrestres, los riesgos geoclimáticos y geológicos (Morcillo, 2009) y los impactos sobre la atmósfera, hidrosfera y geosfera; todo ello integrado en un esquema sistémico cuyo análisis permite la comprensión de los diferentes aspectos sin la pérdida de su concepción global (Pascual, 2000).

Aplicaciones en la educación

La relativa sencillez del esquema sistémico apuntado permite su adaptación educativa a los niveles de la enseñanza obligatoria. Por otra parte, la potencia explicativa y la necesidad de partir de este tipo de consideraciones para poder llegar con nitidez a conceptos tan esenciales hoy día como el de la sostenibilidad conceden un valor educativo muy alto a este enfoque.

CONCLUSIONES EN RELACIÓN CON UNA CULTURA CIENTÍFICA BÁSICA

En ocasiones se ha debatido sobre la conveniencia de contemplar la teoría general de sistemas

en la enseñanza secundaria (ver, por ejemplo, las referencias recogidas en Pedrinaci, 2003, para el caso de la geología), aunque la opinión mayoritaria actual es que la visión sistémica resulta no solo adecuada, sino fundamental en la enseñanza de las ciencias también en este nivel y particularmente en el caso de las ciencias de la Tierra (Pedrinaci, 2001). Parte del debate puede radicar en la forma en que la sistémica es aplicada. Sin embargo, no es difícil estar de acuerdo con la idea de que el enfoque sistémico, entendido como una aproximación global a la realidad, constituye una opción viable y hasta fundamental en la enseñanza obligatoria al ofrecer a los alumnos una visión ordenada de síntesis de una realidad global que ya forma parte de su experiencia cognitiva y perceptiva.

Pero no solo resulta posible incorporar el enfoque general de la teoría de sistemas a la educación secundaria; muchas de sus herramientas son perfectamente asequibles y abren interesantes y novedosas perspectivas en la enseñanza actual. El inspirador de la dinámica de sistemas, Jay W. Forrester, opina que no solo es factible la aplicación de su metodología a este nivel educativo, sino que ello permitiría ofrecer “*un marco para dar cohesión, significado y motivación a la educación en todos los niveles, desde la educación primaria en adelante*” (Forrester, 1992).

La insistencia en lograr una visión sintética o global, junto a la sugerencia de atender principalmente a las interacciones como factor central en la comprensión del funcionamiento de los sistemas -la Tierra, en este caso-, suponen las dos aportaciones fundamentales del enfoque de sistemas a la enseñanza de las ciencias de la Tierra. Ambas han cambiado nuestra forma de percibir e interpretar el planeta y ambas deben, por ello, formar parte ineludible de una enseñanza que persiga ofrecer una cultura científica básica a todos los ciudadanos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer la lectura crítica del texto y las aportaciones derivadas de la misma de Luis Rebollo y Pedro Cañal

BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Almodóvar, G. R. (2013). Los materiales de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 146-154.
- Anguita, F. (1993). La Teoría General de Sistemas y las Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 1.2, 87-89.
- Anguita, F. y Arsuaga, J.A. (2000) ¿Es Gaia una teoría adelantada a su tiempo o una broma vitalista? Reflexiones para C.T.M.A. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8.3, 197-201.
- Aracil, J. y Gordillo, F. (1997). *Introducción a la dinámica de sistemas*. Alianza Editorial. Madrid.
- Bertalanffy, L. von (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller. New York. (Edición en castellano: (1976) *Teoría General de Sistemas*. Fondo de Cultura Económica. México).
- Brusi, D., Roqué, C. y Mas-Pla, J. (2013). Los procesos geológicos externos: las infinitas interacciones en la superficie de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 21.2, 181-194.
- Carley, M. y Spapens, P. (1998). *Sharing the World. Sustainable Living y Global Equity in the 21st Century*. Earthscan. London.
- CMMAD (1988). *Nuestro futuro común*. Alianza Editorial. Madrid.
- Fernández-Martínez, E. M. (2013). Enfoques emergentes en la investigación de la historia de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 155-167.
- Forrester, J.W. (1992). *La Dinámica de Sistemas y el Aprendizaje del Alumno en la Educación Escolar*. Sloan School of Management. MIT. Cambridge. (Traducido al español por el Grupo de Dinámica de Sistemas del ITESM, Monterrey. México). <http://dinamica-sistemas.mty.itesm.mx/docs/Aprendizaje.pdf>.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, Harvard University Press. USA (Edición en castellano: (1996) *La ley de la entropía y el proceso económico*. Fundación Argentaria. Madrid)
- Gil, C. y Calvo, J.P. (Coord.) (2008). Monográfico: Recursos geológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.3.
- Lewontin, R.C. (2000). *Genes, organismo y ambiente. Las relaciones de causa y efecto en biología*. Gedisa. Barcelona.
- Lovelock, J. (1979). *Gaia*. Oxford University Press. (Edición en castellano: (1983) *Gaia*. H. Blume. Madrid).
- Lovelock, J. (1988). *The Ages of Gaia*. The Commonwealth Fund Book. Program of Memorial Solan-
- Kettering Cancer Center. (Edición en castellano: (1993) *Las edades de Gaia*. Tusquets Editores. Barcelona.
- Margulis, L. y Lovelock, J. (1974). Biological Modulation of the Earth's Atmosphere. *Icarus*, 21, 471-489.
- Margulis, L. (1996). *Gaia es una pícaro tenaz*. En: Brockman, J. (1996) *La tercera cultura. Más allá de la revolución científica*. Tusquets Editores. Barcelona.
- Martínez-Frías, J. (2013). El origen de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 139-145.
- Mas-Pla, J. y Brusi, D. (2009). Monográfico: Geología y cambio climático. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.2.
- Monod, J. (1970). *Le hasard et la nécessité*. Editions du Seuil. Paris (Edición en castellano: (1981) *El azar y la necesidad*. Tusquets Editores. Barcelona).
- Morcillo, J.G. (Coord.) (2009). Monográfico: Riesgos geológicos externos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.3.
- Pascual, J.A. (2000). *El teatro de la ciencia y el drama ambiental. Una aproximación a las ciencias ambientales*. Miraguano Ediciones. Madrid.
- Pascual, J.A. (2011). La coevolución de la Tierra y de la vida o cómo se han influido mutuamente la geología y la vida. *Alambique*, 67, 37-45.
- Pedrinaci, E. (2001) (Coord.). Monografía 2: La Tierra como sistema. *Alambique*, 27 (Enero-Marzo 2001).
- Pedrinaci, E. (2003). La enseñanza y el aprendizaje de la geología. En: Jiménez Aleixandre, M.P. (2003). *Enseñar ciencias*. Editorial Graó. Barcelona, 147-174.
- Pedrinaci, E. y Fernández-Martínez, E. (Coord.) (2010). Monográfico: Tierra y Vida. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1.
- 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.
- Rosnay, J. (1977). *El Macroscopio. Una visión global*. Ed. AC. Madrid.
- Schlesinger, W. H. (2000). *Biogeoquímica. Un análisis del cambio global*. Ariel Ciencia, Barcelona.
- Spangenberg, J.H. (2002). Environmental space and the prism of sustainability: frameworks for indicators measuring sustainable development. *Ecological Indicators*, 2, 4, 295-309.
- Vernadsky, V.I. (1997). *La biosfera*. Fundación Argentaria-Visor. Madrid. ■

Fecha de recepción del original: 07/01/2013
Fecha de aceptación definitiva: 03/06/2013