

2. DIFICULTADES PARA EL APRENDIZAJE DE LA DINÁMICA TERRESTRE: APORTACIONES DEL ANÁLISIS HISTÓRICO Y EPISTEMOLÓGICO¹

La epistemología y la historia de la Geología pueden realizar aportaciones substanciales a la comprensión de algunas claves que ayudan a entender muchos de los problemas relacionados con la enseñanza de los procesos geológicos internos, no sólo en la medida en que contribuyen a identificar ciertas dificultades existentes en la construcción del conocimiento, sino también porque pueden ofrecer pautas para su tratamiento en el aula. Así, se pretende mostrar cómo ayudan a:

- Detectar la existencia de obstáculos epistemológicos.
- Orientar el modo de superar dichos obstáculos.
- Conocer la potencialidad y funcionalidad de los conocimientos.

2.1 Detección de obstáculos epistemológicos

Desde que Bachelard resaltase la importancia del conocimiento de la historia de la ciencia y la epistemología para la enseñanza de las ciencias, han sido muchos los autores que han destacado su interés. Así, Gagliardi y Giordan² o Duschl³ consideran que la historia de la ciencia puede ser un instrumento importante para detectar las dificultades de aprendizaje existentes en un determinado campo del saber y para orientar la estrategia que permita su superación.

Desde esta perspectiva tan importante es analizar los momentos de la historia de la ciencia en que se producen grandes avances (permite ver qué nuevos conceptos, procedimientos o teorías se ponen en juego para facilitar el progreso), como estudiar aquellas largas etapas en las que ese avance parece muy dificultoso. Puede ocurrir que el estancamiento, o incluso retroceso, no sea casual sino que responda a la existencia de obstáculos, algunos de los cuales es posible que compartan nuestros alumnos.

No se pretende indicar con esto, como a veces se ha señalado, que la ontogenia repita la filogenia. Los estudiantes no reconstruyen de manera resumida las etapas por las que ha atravesado el pensamiento científico. No puede ser así, el contexto social, tecnológico y cultural en el que hoy vive el estudiante es muy diferente de aquél en el que el filósofo o científico del pasado elaboró su teoría. Sin embargo sí que es posible detectar en el alumnado ciertas perspectivas arcaicas y en estos casos es necesario interrogarse por qué, ¿cuáles son las razones que subyacen en estas coincidencias?

Bachelard⁴ considera que "*Cuando se investigan las condiciones psicológicas del progreso de la ciencia, se llega muy pronto a la convicción de que hay que plantear el problema del conocimiento científico en términos de obstáculos. (...) es ahí donde*

¹ El texto que sigue es un resumen del libro: Pedrinaci, E. (2001): *Los procesos geológicos internos*. Ed. Síntesis. 222 páginas.

² Gagliardi, R. y Giordan, A. ,1986. La historia de las Ciencias: una herramienta para la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 4, nº 2, 253-258.

³ Duschl, R. 1990. *Restructuring Science Education. The importance of Theories and Their Development* (Trad. Cast. 1997, Renovar la Enseñanza de las Ciencias. Narcea. Madrid).

⁴ Bachelard, G. 1938. *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin, París (Tr. cast. La formación del espíritu científico, 1983, Siglo XXI. México).

mostraremos causas de estancamiento y hasta de retroceso, es ahí donde discerniremos causas de inercia que llamaremos obstáculos epistemológicos".

Un excelente ejemplo de lo que puede ser un obstáculo epistemológico, y del papel clave que desempeña en la construcción del conocimiento, es el del *origen de los fósiles*. Se trata del problema geológico más debatido a lo largo de los siglos XV, XVI y XVII. Desde la perspectiva actual puede resultar sorprendente, especialmente si se tiene en cuenta que los alumnos de secundaria, incluso aquellos que habitualmente se les considera "malos alumnos" relacionan el fósil con la existencia en el pasado de un organismo del cual, de una u otra forma, procede. Quizá estos estudiantes no sepan ofrecer una definición de fósil, o desconozcan cómo ha podido producirse el proceso de fosilización, pero no dudan de su origen orgánico. ¿Cómo interpretar, entonces, que los filósofos y naturalistas no fuesen capaces de explicar algo que parecen entender alumnos con escasa formación?

No todos los fósiles presentaban igual grado de dificultad para su interpretación. Los fósiles marinos recientes que, con frecuencia, pertenecen a especies actuales, y cuya naturaleza orgánica no era posible negar, se encuentran por lo general en sedimentos sin compactar próximos a zonas marinas. Ello permitía explicar su existencia suponiendo cambios geográficos de una magnitud aceptable para las concepciones de la época a la que se ha hecho referencia, al tiempo que evitaba una de las dificultades conceptuales para su interpretación: *la noción de diagénesis*.

Por el contrario, suponer un origen orgánico para los fósiles encontrados en el interior de rocas perfectamente diagenizadas implicaba, no sólo aceptar cambios geográficos de enormes proporciones, sino además explicar cómo podían haber penetrado en el interior de rocas coherentes cuyo aspecto resultaba muy diferente al de los sedimentos. O dicho en otros términos, implicaba tener construido no sólo el concepto de sedimentación sino, además, el concepto de diagénesis.

Para Rudwick⁵ gran parte de los filósofos que frecuentemente han sido citados por historiadores de la ciencia como pensadores que supieron dar una interpretación "correcta" del origen de los fósiles, se han referido a los llamados fósiles "fáciles". Es el caso, por ejemplo, de Jenophanes de Colophon (siglo VI a. C.).

Leonardo da Vinci (1452-1519) conocía los procesos de erosión y sedimentación, incluso explicaba la consolidación de las rocas como un proceso de "secado" de dichos sedimentos. Ello le permitió dar una interpretación sorprendentemente moderna del origen orgánico de los fósiles. No obstante, señala Rudwick, él se refería esencialmente a los fósiles cenozoicos del norte de Italia, generalmente moluscos muy parecidos a los que actualmente viven en el Mediterráneo.

Otro autodidacta como Leonardo que hace importantes aportaciones sobre el origen de los fósiles es Bernard de Palissy (1510-1590). Palissy no duda del origen orgánico de los fósiles, incluso, y esa es probablemente su innovación más destacable, de los que no se conocen ejemplares similares en la actualidad y que él considera especies "perdidas".

Quizá convenga destacar que aunque Palissy está persuadido de que el origen de los fósiles no debe buscarse en el diluvio ni en los "juegos de la naturaleza", sino que son restos de seres vivos que han sido petrificados, sin embargo ello no le conduce a dar

⁵ Rudwick, M. 1976. *The meaning of fossils: episodes in the History of Paleontology*. University of Chicago. Illinois (Trad. Resines, A. *El significado de los fósiles*, 1987, Blume: Madrid).

el siguiente paso que, desde la perspectiva actual, resultaría inevitable: admitir importantes cambios en la distribución de tierras y mares en el pasado. Por el contrario formula interpretaciones "ad hoc" para explicar la presencia de fósiles marinos en lugares alejados del mar. Ello permite apoyar la idea de la importancia de los cambios geográficos, o más correctamente, de la concepción inhibidora de dichos cambios: *el fijismo como obstáculo epistemológico*.

Más aún que los "aciertos" parciales en la interpretación de los fósiles, resulta extraordinariamente ilustrativa la dificultad para admitir su origen orgánico, que tuvieron naturalistas cuyo conocimiento de los seres vivos era lo suficientemente profundo como para que fuese casi inevitable. La cuestión era más compleja, ya que no se trataba sólo de dar una explicación causal de la forma de los fósiles, sino además de la materia que los constituía y, sobre todo de su presencia en el interior de rocas consolidadas y su ubicación geográfica. Por ello no debe extrañar que resultara más plausible una explicación que recurriese a "fuerzas moldeadoras" o a "semillas" arrastradas por las filtraciones de agua.

Así, Falloppio (1532-1563) cuyos trabajos de anatomía en Padua fueron de gran relevancia, aún siendo consciente de las semejanzas entre ciertos fósiles y los seres vivos opinaba que su presencia en la cima de colinas alejadas del mar, hacía que su origen orgánico resultara inaceptable. Por ello parecía inclinarse antes por una explicación basada en la generación espontánea, o en la existencia de fluidos petrificantes de diversa naturaleza que justificase la diferencia en las propiedades físicas de los "objetos excavados", que admitir cambios geográficos de proporciones tan enormes.

Todo ello parece indicar que la necesidad de incluir cambios geográficos de gran envergadura en las teorías sobre el origen de los fósiles y de las rocas ha constituido, en el sentido "bachelardiano", un verdadero obstáculo epistemológico.

Una explicación recurrente sobre el origen de los fósiles era la que partiendo de su origen orgánico, justificaba su localización relacionándolos con el diluvio. Martin Lutero, que debía estar familiarizado con las rocas pues era hijo de un minero, en su obra *"In primum librum Mose enarrationes"* (1544) como parte de sus comentarios al Génesis, defiende dichas posiciones. Probablemente el triunfo de la Reforma protestante ayudó a la difusión de las explicaciones diluvalistas que, por lo demás, también se hallan presentes en los científicos católicos, llegando a ser las tesis dominantes a finales del siglo XVII.

Como puede verse, no bastaba con defender un origen orgánico de los fósiles para dar una explicación mínimamente satisfactoria, desde el punto de vista científico actual, de su presencia en el interior de rocas situadas en la cima de algunas montañas. Hoy podemos afirmar que, además de contar con ideas acerca de los procesos de fosilización, ello exigía disponer de:

- *Una teoría de la sedimentación*, que explicase la simultaneidad en el depósito de los restos de seres vivos y los materiales inorgánicos.
- *Una teoría de la diagénesis*, que permitiera comprender los procesos por los que un sedimento puede transformarse en una roca sedimentaria.
- *Una teoría orogénica*, que justificase cómo los materiales depositados en un fondo oceánico pueden deformarse y emerger hasta ocupar la situación actual.

John Ray (1627-1705), en su trabajo *"Observations topographical, moral and physiological, made in a Journey through part of the low Countries..."* planteó la solidez de los argumentos, tanto a favor como en contra, del origen orgánico de los fósiles. Expuso, de una parte, que la naturaleza de las similitudes entre las conchas de los seres vivos y los fósiles, hacían poco creíble cualquier interpretación que no fuera la del origen orgánico. Así, la articulación que presentaban las conchas de los bivalvos fósiles era igual que la de los vivientes y no parecía razonable su presencia en los fósiles si no había sido funcional. De otra parte, el hecho de tratarse de especies diferentes obligaba a admitir la extinción de especies. Esto suponía dificultades de diversa índole, no siendo la menor de ellas que implicaba que la Creación original no había sido perfecta.

Ante esta dificultad, John Ray prefería suponer que se trataba de especies que seguían vivas, aunque todavía no habían sido descubiertas. Hipótesis especialmente verosímil, en un momento en que los continuos viajes al nuevo mundo estaban mostrando la existencia de especies hasta entonces desconocidas. No obstante, quedaban sin resolver problemas como la presencia de los fósiles en el interior de estratos rocosos y su ubicación a veces en cumbres muy altas. El recurso al diluvio o a la acción de terremotos causantes del levantamiento de las montañas, aunque no le parecían suficientemente sólidos, eran los únicos de que disponía.

El *fijismo* ha supuesto un gran obstáculo epistemológico para la construcción de las teorías sobre el origen de las rocas, sobre la edad de la Tierra o sobre el origen de las cordilleras y todo parece indicar que hoy sigue constituyendo una de las grandes dificultades para que los alumnos de la ESO se apropien de las claves que regulan la dinámica terrestre. Esta circunstancia justifica que se le esté dedicando una atención especial.

2.2 Orientación sobre el modo de superar dichos obstáculos

La descripción de un mismo hecho ha sido utilizada con frecuencia para avalar teorías contrapuestas. Los conocimientos, a diferencia de lo que a veces parece sugerirse, no se deducen linealmente de los hechos por un proceso de inducción sino que, como apuntan Giordan y Vecchi⁶, *"se trata siempre de algo elaborado, que responde a una necesidad y a los problemas que nos planteamos, siendo el fruto de un proceso de abstracción y de formalización, que se establece en la mayoría de las ocasiones en ruptura con la evidencia"*.

El análisis de la evolución del conocimiento, no sólo ayuda a comprender la dificultad que puede plantear la introducción en el curriculum de ciertos contenidos, sino que en ocasiones aporta orientaciones relevantes acerca del modo de abordar en el aula dichas dificultades: sugiriendo el uso de determinados "conceptos puente", la necesidad de introducir cambios metodológicos o la relación existente entre la adquisición del conocimiento en cuestión y un cambio actitudinal.

Así, en el caso del origen de los fósiles, Steno (1638-1686) tiene el enorme acierto de formular su hipótesis integrándola dentro de una teoría sobre los procesos de formación de las rocas estratificadas. Haciendo el estudio anatómico de un tiburón

⁶ Giordan, A. y Vecchi, G. (1987): *Les orígenes du savoir*. Delachaux- Niestlé. Neuchâtel (trad. Martínez, A. *Los orígenes del saber*, 1988, Diada. Sevilla).

gigante, identificó sus dientes con las "glosopetrae" (enigmáticos fósiles sobre los que existía una gran polémica), llegando a la conclusión, que rechazó que fuese categórica, del origen orgánico de estos fósiles. Expuso sus conclusiones en "*Canis Carcharie*" (1667). Comenzó su ordenada argumentación mostrando que no había ninguna evidencia acerca de su posible crecimiento *in situ* en el interior de la roca. Los dientes de tiburón, al principio debieron estar recubiertos por tierra sin compactar, dado que no presentaban deformaciones como las raíces de los árboles que crecen en los intersticios de las rocas.

Las diferencias entre la naturaleza del material que componía las "glosopetrae" y los dientes de tiburón los explicaba como resultado de impregnaciones o de pérdidas de productos volátiles. Finalmente Steno considera que "*Nada parece oponerse a que los cuerpos extraídos de la tierra, parecidos a partes de animales, sean considerados partes de animales*", y "*no veo nada que nos impida considerar esta tierra como un sedimento del agua, acumulado poco a poco*".

Steno da respuestas a las cuestiones relacionadas con la forma de los fósiles, la naturaleza de la materia que los constituye y su localización en el seno de los estratos. Estas respuestas coherentes son posibles en la medida en que dispone de una teoría acerca de la formación de las rocas, lo que le permite justificar la presencia en ellas de fósiles que se habrían depositado al mismo tiempo que los sedimentos. O, dicho en otros términos, Steno intuyó, a diferencia de sus contemporáneos, que los procesos de fosilización y de formación de la roca eran sincrónicos.

2..3 Valoración de la potencialidad y funcionalidad de los conocimientos

Seleccionar el contenido de la enseñanza es una tarea tan difícil como necesaria. La ciencia está generando nuevos conocimientos continuamente y lo hace a un ritmo tal que hoy existe consenso en la imposibilidad de tratar en la enseñanza obligatoria, incluso los contenidos que tradicionalmente se vienen considerando como básicos. Si, en consecuencia, se ha de realizar una selección del curriculum, deberá disponerse de algunos criterios que permitan adoptar una decisión fundamentada.

Para Gagliardi existen conocimientos que una vez que han sido construidos por los alumnos determinan una transformación y reestructuración de su sistema conceptual. Son los que denomina conceptos estructurantes. Gagliardi y Giordan (op. cit.) señalan tres instrumentos que pueden ayudar a definir cuáles son esos conceptos estructurantes: el análisis de las representaciones sociales, el análisis de los momentos de transformación de la ciencia y el análisis de las teorías científicas actuales.

La historia de la Geología ayuda a conocer cuáles fueron los conocimientos que estaban presentes en los momentos en que se produjeron cambios importantes en esta ciencia, y su análisis puede permitir determinar cuáles de esos conceptos, procedimientos o actitudes han favorecido la reestructuración del conocimiento y han impulsado su avance. La historia de la Geología es, en consecuencia, una buena herramienta para conocer el núcleo central de un cierto campo del saber y valorar la potencialidad organizadora y reestructuradora que atesoran determinados conocimientos.

Uno de los conceptos geológicos más importantes y con mayor potencialidad organizadora es que "*Las rocas pueden ser consideradas archivos históricos que contienen información sobre las condiciones en que se originaron y las alteraciones*

posteriores que han experimentado" (Sequeiros y Pedrinaci)⁷. En efecto, a partir del momento de la introducción de este concepto comienza a ser posible indagar sobre bases sólidas el pasado terrestre. Es decir, la noción de las rocas como documentos o archivos que contienen información sobre el momento, el lugar y las condiciones en que se formaron, se convierte en lo que, utilizando la terminología de Lakatos, podría denominarse un programa de investigación científica.

La construcción de este concepto supone para el alumno, como ocurrió históricamente, no sólo una forma diferente de ver las rocas, sino que otorga una nueva dimensión al aprendizaje de la geología, pasando a convertirse en el aprendizaje de aquellos instrumentos metodológicos y conceptuales que nos ayudan a descifrar las rocas, a conocer su pasado y, por ende, el pasado de la Tierra.

No sólo existen conceptos de gran potencialidad, también hay procedimientos que han mostrado una enorme capacidad para generar conocimiento, es el caso del *actualismo*. El actualismo es utilizado con frecuencia como sinónimo de uniformismo, pero no es éste el significado que se le da aquí sino que, de acuerdo con Hooykaas el actualismo es un método de análisis según el cual la forma en que puede reconstruirse el pasado es analizando las causas que intervienen en la actualidad. No es, como el uniformismo, necesariamente gradualista, es decir no exige un ritmo idéntico de los procesos naturales para todo el pasado geológico. Así, el actualismo como método puede ser utilizado tanto desde una perspectiva uniformista como desde otra neocatastrofista.

Hodson⁸ plantea la necesidad de considerar la funcionalidad del conocimiento como uno de los criterios para la determinación del conocimiento escolar: "*en la enseñanza de la ciencia, el grado de sofisticación teórica en cualquier etapa debería ser determinado por la capacidad de la teoría para explicar los fenómenos que encontrarán los alumnos. No necesita ir más allá.*" Hodson confiesa que le resulta tentador sugerir que en ausencia de fenómenos para ser explicados, no hay necesidad de teoría. De esta manera las teorías podrían seguir un proceso de complejidad y desarrollo a lo largo de la educación científica de un niño, "*que quizás siga líneas similares a las de su desarrollo histórico.*"

Parece clara la necesidad de valorar la utilidad que para el alumno de la enseñanza no universitaria puede tener tanto en la resolución de problemas cotidianos, como en la comprensión de la realidad que le rodea, así como en la relevancia para su vida futura. Pero se podría añadir algo más, la historia de la Geología está plagada de ejemplos que muestran cómo conceptos o teorías que hoy han sido superados por formulaciones más complejas, sin embargo han tenido una gran funcionalidad. De tal manera que no sólo han ayudado a comprender mejor el mundo que nos rodea, sino que han favorecido, fundamentado y otorgado coherencia interna a proyectos de investigación que han movilizadado las ideas dominantes y sentado las bases para futuros desarrollos del conocimiento.

Así, por ejemplo, Steno formula en su *Prodromus* (1669) los *principios de superposición, continuidad y horizontalidad de los estratos*⁹. La formación de los

⁷ Sequeiros, L. y Pedrinaci, E. 1992. Una propuesta de contenidos de Geología para la E.S.O. *III Congreso Geológico de España*. Salamanca, v. 1, 471-480.

⁸ Hodson, D. 1986. Philosophy of Science and Science Education. *Journal of Philosophy of Education*, v. 20, 2

⁹ *El Pródromo*. Nicolaus Steno. (trad. L. Sequeiros). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2003 (10.3).

estratos es descrita por Steno como un proceso histórico en el que el orden de superposición indica la secuencia de formación. Dos años antes, en "*Canis Carcharie*" había señalado que los estratos son antiguos depósitos acumulados poco a poco. Aquí, Steno realiza una inferencia más en su hipótesis: si las rocas no datan del momento en que se originó la Tierra sino que han ido formándose poco a poco, unas tendrán más antigüedad que otras y deberá ser posible secuenciarlas u ordenarlas de acuerdo con un criterio espacio-temporal, el criterio de superposición.

La Geología hoy ha introducido importantes limitaciones y correcciones a estos tres principios. En efecto, indica Anguita¹⁰ que en los complejos subductivos el apilamiento se produce por el muro y no por el techo de la serie y, aunque cabría señalar que no hay violación del principio de superposición al tratarse de una serie tectonizada, debe tenerse en cuenta, de una parte, que el proceso de tectonización es simultáneo a la construcción de la secuencia sedimentaria y, de otra, que los complejos subductivos comprenden los mayores volúmenes de sedimentos, por lo que resulta difícil considerarlos una excepción. Igualmente el principio de horizontalidad es sólo parcialmente válido (en los bordes de cuenca la pendiente original puede ser importante, etc.). Lo mismo podría indicarse del principio de continuidad lateral que olvida la existencia de transgresiones, etc.

¿Quiere esto decir que debe optarse entre olvidarse de estos principios o tratarlos con todas las matizaciones y complejidades con las que hoy los formula la Geología? La respuesta no puede ser afirmativa. Estos tres principios han mostrado una enorme potencialidad, sobre ellos se ha construido toda una ciencia, la Estratigrafía, y son perfectamente funcionales para los alumnos.

Ello vendría a avalar la sugerencia que hace Driver¹¹: "*Conviene también que consideremos seriamente la necesidad de un curriculum que no suponga que los alumnos comprenden una teoría en su forma más elaborada desde la primera vez que se les enseña*".

Sequeiros, L. (2003): Las raíces de la Geología, Nicolás Steno, los estratos y el diluvio universal. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2003 (10.3)

¹⁰ Anguita, F. 1988. *Origen e Historia de la Tierra*. Rueda. Madrid.

¹¹ Driver, R. 1986. Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4, pp 3-15.