

## RAZONAMIENTO BASADO EN MODELOS Y CAMBIO CONCEPTUAL

Nancy Nersessian

### EL PROBLEMA OBJETO DE ESTUDIO

En esta amplia reseña, se recogen las líneas principales del trabajo desarrollado por Nancy Nersessian al analizar los mecanismos que permiten al científico modificar sus teorías en los momentos creativos de "descubrimiento científico". Nos referiremos concretamente a tres trabajos publicados por dicha autora (Mersessian, 1992, 1999, 2002), que recopilan una parte importante de su producción en relación al cambio conceptual en ciencias<sup>[1]</sup>, un tema de interés tanto para la filosofía de la ciencia, como para la psicología y para la didáctica de las ciencias.

Se trata de interpretar los procesos creativos mediante los cuales los científicos llegan a crear conocimiento nuevo, campo que durante mucho tiempo ha sido considerado inaccesible e inabordable tanto desde la filosofía como desde la psicología. En efecto, la hipótesis mantenida durante tiempo por los filósofos de la ciencia ha sido que los procesos de descubrimiento son demasiado complejos y misteriosos como para poder llegar a ser entendidos. Esta visión ha sido defendida utilizando como referente algunos episodios de descubrimiento científico ocurridos en la historia de la ciencia<sup>[2]</sup>, en los que las ideas innovadoras más brillantes parecen emerger de momentos inspiración súbita en la mente de "los grandes genios". Aunque esta es la imagen más popular del descubrimiento científico, desde ella se ignoran, como señala la propia Nersessian, los largos y arduos procesos de pensamiento y de actividad mental que precede a esos instantes de descubrimiento. Según ella, el propio Thomas Khun llega a incurrir en esta misma visión del cambio cuando nos habla de la "incommensurabilidad" de las teorías científicas, identificando el cambio conceptual con el proceso final de desenlace del cambio, justamente a partir del momento en el que las piezas parecen encajar desde una perspectiva nueva<sup>[3]</sup>. Y de ahí también la idea de cambio conceptual en la ciencia que ha predominado, basada más en la competencia entre teorías rivales ya hechas, que en los propios procesos prolongados de generación de las nuevas ideas a partir de las anteriores.

En contraste con este planteamiento, Nersessian asume la necesidad de abordar el problema del cambio conceptual desde la psicología cognitiva, única vía que puede permitirnos acceder a los procesos mediante los cuales se crean las nuevas representaciones científicas a partir de las representaciones previamente existentes. Precisamente, el fin principal del método histórico-cognitivo, utilizado aquí como método de estudio, radica en su utilidad para aproximarnos a la reconstrucción del pensamiento científico por medio de las teorías cognitivas.

### EL MÉTODO DE ESTUDIO Y LOS PRESUPUESTOS DE PARTIDA

Frente a las formas clásicas de investigación en este campo, basadas en el análisis de protocolo y métodos etnográficos de prácticas científicas en contextos naturalísticos o del mundo real, o los métodos tradicionales "in Vitro" de psicología experimental que indagan sobre cómo los científicos resuelven problemas auténticos en situaciones

experimentales tradicionales, en esta ocasión se recurre a otro planteamiento. El enfoque metodológico empleado se basa en el estudio de casos históricos. Para ello se recurre a los escritos de los propios científicos, entre ellos sus cuadernos de notas, su correspondencia, los diarios personales, etc., los cuales pueden proporcionar reflexiones metacognitivas que nos muestren cómo han ido gestando, refinando y extendiendo sus ideas.

Estos estudios analizan las prácticas de los científicos a la luz de la ciencia cognitiva, desde la hipótesis de que los mecanismos que pone en marcha el científico para razonar científicamente son básicamente los mismos que en otras circunstancias de la vida diaria. A pesar de moverse en un plano cognitivo, al referirse a la cognición científica, no solo se alude a patrones de transformación de información interna, dentro de los individuos, sino también aquellas otras que implican la relación entre individuos, instituciones sociales o artefactos desarrollados a lo largo de la historia (herramientas y conceptos). Por tanto, el método combina estudios de caso de prácticas científicas con herramientas y teorías analíticas de la ciencia cognitiva, a fin de crear una nueva teoría acerca de cómo se construyen las estructuras conceptuales en las ciencias y cómo cambian con el tiempo. Desde el punto de vista metodológico, el reto estriba, pues, en encontrar una nueva forma de usar la historia de las prácticas de conocimiento científico como base para desarrollar una teoría del cambio científico.

### **EL MARCO TEÓRICO: LA BASE COGNITIVA DEL RAZONAMIENTO BASADO EN MODELOS**

Un aspecto importante en este punto es disponer de algún sistema de representación del conocimiento mediante el que rastrear los mecanismos a través de los cuales se producen las nuevas representaciones científicas a partir de las anteriores.

Respecto al primer punto, decir que los filósofos y los científicos cognitivos han propuesto distintas formas de representación, existiendo todavía hoy controversia en torno al modo de representación del conocimiento más adecuado: representaciones lingüísticas, formulísticas, visuales, analógicas, etc. Este aspecto es reconocido por la propia Nersessian, quien aboga por los modelos mentales<sup>[4]</sup> como el formato de representación más útil para contemplar los procesos de razonamiento que tienen lugar durante la resolución de problemas.

Con respecto al segundo aspecto mencionado, señalar que aunque, en efecto, los procesos de cambio en las representaciones científicas son procesos creativos complejos y, por ello, difíciles de escrutar, ello no implica que no sean procesos racionales y consecuentemente sujetos a patrones y regularidades que se pueden estudiar. Así, existe numerosa evidencia histórica que nos muestra cómo el cambio conceptual en la ciencia descansa normalmente sobre un proceso de resolución de problemas. Por ello, es preciso ampliar la noción de ciencia como empresa de resolución de problemas para incluir lo que tradicionalmente se ha venido en llamar "cambio conceptual". Donde las nuevas ideas no emergen espontáneamente de las cabezas de los científicos sino que resultan de múltiples episodios de resolución de

problemas interconectados a lo largo de un periodo de tiempo prolongado que, a veces, afectan incluso a generaciones de científicos.

Desde aquí se contempla que, en ciertas tareas de resolución de problemas, el razonamiento se puede explicar mediante la construcción y manipulación de modelos mentales en la memoria de trabajo, que son dinámicos y que, por tanto, pueden ser manipulados a través de simulación. La tesis central que dirige, pues, el trabajo de esta autora consiste en asumir que el razonamiento basado en modelos es generador de cambio representacional en la ciencia. Los modelos van primero, y luego se produce la abstracción para crear las expresiones formales que conforman las leyes y axiomas de las teorías. Las prácticas modelizadoras pueden llevarse a efecto tanto en situaciones experimentales como teóricas. El modelo constituye una representación mediadora entre los fenómenos y la expresión del lenguaje (incluido el matemático) y actúa como facilitador del cambio conceptual, dado que facilita los procesos de inferencia en situaciones de incertidumbre. De esta manera podemos generar conclusiones sin tener que procesar necesariamente toda la información que abarcaría la representación proposicional.

A partir de aquí, y a lo largo de los tres trabajos, la autora revisa distintos casos históricos en la producción científica de autores como Galileo, Newton, Faraday, Maxwell, Böhr, Einstein, etc, al objeto de ilustrar cuáles fueron los heurísticos usados durante los procesos creativos de nuevas representaciones durante la resolución de problemas. Las memorias, diarios y cartas de estos científicos muestran un amplio uso de prácticas que, en opinión de la autora, constituyen formas de razonamiento basadas en modelos. En consecuencia, la teoría psicológica de la modelización mental proporciona una base en la cognición humana para adoptar los rastros externos de modelización dejadas en la práctica científica, como un indicador de que el razonamiento basado en modelos es capaz de generar la formación y cambio de conceptos.

## **RESULTADOS DE SU ESTUDIO: LOS HEURÍSTICOS USADOS EN LOS PROCESOS CREATIVOS EN LA CIENCIA**

Los estudios de caso desarrollados muestran que la clase de razonamiento creativo ensayado en la innovación conceptual involucra no solamente aplicar abstracciones genéricas ,sino crearlas y transformarlas durante el proceso de razonamiento. Concretamente, a la hora de entender cuáles son los instrumentos que posibilitan los procesos creativos en el cambio conceptual, Nersessian habla de tres heurísticos o "técnicas de abstracción" diferentes aunque suelen ser utilizados de forma combinada: (1) razonamiento analógico; (2) razonamiento a través de imágenes; y (3) experimentos mentales. Para ella, los tres son procesos de modelización muy importantes que prevalecerían en los períodos de cambio conceptual radical. En contraste con ello, como señala la propia autora, habitualmente todos ellos han sido ignorados al considerar los ingredientes del método científico, reduciéndose el razonamiento científico a procesos meramente inductivos y deductivos. En opinión de Nersessian, esta podría ser la causa de nuestra capacidad, hasta ahora, de estudiar las

prácticas creativas de los científicos y, en consecuencia, los procesos de cambio conceptual.

### Razonamiento analógico

Existen numerosos casos en los que la analogía ha jugado un papel central en la construcción de un nuevo concepto científico: la analogía de Newton entre el movimiento de proyectiles y de la Luna, que culminó con la ley de gravitación universal); la analogía de Darwin entre la crianza y la reproducción selectiva en la naturaleza, que dio origen a la teoría de selección natural; y la analogía de Bohr-Rutherford entre la estructura del sistema solar y la estructura atómica<sup>[5]</sup>. Desde el punto de vista de la autora, las analogías sirven como una forma de focalizar y entender las restricciones que afectan a un fenómeno o situación dada a través de las restricciones de otro que se considera análogo con él. En este contexto la abstracción analógica constituye un proceso clave en la modelización analógica, la cual, con frecuencia, requiere reconocimiento de las similitudes potenciales entre un dominio y otro, junto a la integración de información desde dominios diferentes.

A lo largo de los trabajos reseñados, Nersessian pasa revista a una serie de casos históricos en los que el razonamiento analógico parece haber jugado un papel importante en el proceso de descubrimiento científico, como es el caso de los trabajos de Newton sobre la gravedad y los de Maxwell sobre las relaciones entre electricidad y magnetismo. A partir de ellos, la autora concluye que "*las analogías no son meras guías para pensar... sino que ellas mismas hacen posible la labor inferencial y generan la solución del problema*" (p. 20). Por esta razón, implicar a alguien en la modelización analógica requiere de conocimiento de las restricciones y principios generativos de los modelos físicos en un dominio fuente. Tales restricciones pueden ser representadas mentalmente en diferentes formatos de información y estructuras de conocimiento, las cuales actúan durante la resolución de problemas como afirmaciones tácitas ensayadas al construir y transformar modelos. Analogías inter o intra dominios pueden ser recuperadas y aplicadas como modelos para la ocasión con la adaptación requerida, si bien, con frecuencia, especialmente en los casos de cambio conceptual, no existe ninguna analogía directa por lo que se requiere la construcción previa de una modelo fuente. En estos casos, el dominio analógico sirve como fuente de restricciones que pueden usarse en interacción con las que proporciona el problema objeto para crear análogos imaginarios.

Según todo esto, la formación de conceptos por medio del razonamiento analógico puede caracterizarse como un proceso de abstracción de representaciones existentes con un aumento del cumplimiento de restricciones. Ello nos conduce a una nueva interpretación de la continuidad y comensurabilidad entre representaciones en términos de las relaciones comunes abstraídas para la estructura de la fuente y del objeto.

Un aspecto importante que se deriva de los estudios de caso revisados, es la importancia que las imágenes generadas por los científicos juegan en los procesos de cambio conceptual. Unas veces, como elemento subsidiario del propio proceso de

razonamiento analógico, y otras como elementos complementarios que sirven para generar nuevos conceptos e ideas a nivel abstracto.

### **Razonamiento a través de imágenes**

Aunque menos considerados que los procesos de razonamiento analógico, el análisis histórico-cognitivo nos revela también numerosos casos en los que el razonamiento a través de representaciones pictóricas ha jugado un papel esencial en las prácticas constructivas de los científicos que intentaban articular nuevas conceptualizaciones.

Tales representaciones mediante imágenes han sido usadas con frecuencia en conjunción con el razonamiento analógico en ciencias, constituyendo un heuristicismo que ha servido para focalizar la atención sobre determinados aspectos del fenómeno en estudio y como un nivel intermedio de abstracción entre el fenómeno y la representación matemática mediante fórmulas.

Tal como son usadas por los físicos, las representaciones a través de imágenes participan en los fenómenos de modelización de diversas maneras, que incluyen la aportación de representaciones abstractas e idealizadas sobre aspectos del fenómeno que incorporan aspectos de los modelos teóricos. En este sentido la herramienta visual permite al que razona eludir las ataduras inherentes a las representaciones lingüísticas y formulísticas de las estructuras conceptuales existentes. Estas representaciones ayudan significativamente a organizar la actividad cognitiva durante el razonamiento, por ejemplo para fijar la atención sobre los aspectos más salientes de un modelo durante el razonamiento, permitir la recuperación y almacenaje de información, o mostrar las interconexiones más salientes de tipo estructural y causal en el momento adecuado. Por ejemplo, representaciones visuales como las utilizadas por Maxwell para modelar analógicamente la naturaleza electromagnética de la materia, o las líneas visuales trazadas por Faraday para describir el efecto de fuerzas en el entorno que produce un imán (líneas de fuerza), constituyen elementos que contribuyen a la construcción de modelos mentales consensuados en una comunidad y a la extrapolación de un modelo fuera del ámbito local en el que ha sido construido. Según esto, las representaciones visuales externas vienen a facilitar la construcción de un modelo interno.

Finalmente, decir que hay una vasta literatura sobre la imaginería mental que proporciona evidencia de que los humanos podemos realizar combinaciones y transformaciones imaginarias simulativas que tratan de expresar las transformaciones espaciales percibidas. Se supone que estas simulaciones toman lugar usando condiciones interiorizadas durante la percepción. Este tipo de simulaciones imaginarias suelen denominarse experimentos mentales y constituyen otra forma más de razonamiento basado en modelos.

### **Experimentos mentales y análisis de casos límites**

Si bien algunos modelos mentales manejan solo representaciones estáticas, los experimentos mentales manejan representaciones dinámicas, a modo de simulaciones imaginarias. Los experimentos mentales son experimentos dirigidos mentalmente, sin necesidad de que se ejecuten, con el objetivo de extraer conclusiones acerca de una

situación o fenómeno dado. Ejemplos de razonamientos de este tipo los encontramos, entre otros, en algunos de los razonamientos empleados por Galileo o Einstein. Comparten con las analogías el uso de elementos gráficos y visuales, siendo frecuente que ambos recursos se acompañen de dibujos e ilustraciones[6].

Desde la ciencia cognitiva se entiende que la capacidad del ser humano para utilizar este tipo de heuristicas es función de las representaciones y restricciones interiorizadas durante la percepción y la actividad motriz, y consecuencia también al conocimiento teórico que posee el sujeto acerca del fenómeno en sí. Al ejecutar el experimento, el sujeto recurre a diversos mecanismos de inferencia, a las representaciones existentes y al conocimiento general del mundo, generando a partir de todo ello transformaciones realistas desde un estado físico al siguiente. De esta manera, los datos que derivan de un experimento mental, aun cuando son construidos mentalmente, son al mismo tiempo consecuencias del conocimiento, apuntando en muchos casos hacia la necesidad de un cambio representacional.

Desde la teoría de los modelos mentales, los experimentos imaginarios implican construir un modelo mental y "correr" una simulación mental de la situación perfilada por el modelo. En este sentido, los estudios de casos históricos analizados por la autora demuestran que el experimento mental implica, por parte del científico, imaginar una secuencia de eventos, pero también desarrollar un contexto narrativo que sirve para guiar el proceso y con el fin de comunicar el experimento a otros.

Los experimentos mentales juegan un papel crucial en el cambio conceptual, mostrando qué sistema de restricciones existentes no puede ser integrado en modelos consistentes del mundo físico. Creando un modelo simulativo que intente integrar sistemas específicos de restricciones, los experimentos mentales permiten al científico superar los puntos esenciales de conflicto, e inferir sus consecuencias más rápidamente de lo que sería posible razonando a partir de las consecuencias lógicas de una representación. De ahí que, a veces, los científicos creen modelos erróneos y que la revisión y evaluación se convierta en un componente crucial del razonamiento basado en modelos. De ahí que autores como khun consideren al experimento mental como una de las herramientas analíticas esenciales empleadas durante los períodos de crisis y que ayudan a promover reforma conceptual básica.

Los estudios de casos límite pueden considerarse como casos especiales de experimentos mentales. Aquí la simulación que tiene lugar consiste en abstraer dimensiones físicas específicas para crear una representación idealizada, tal como la caída de un cuerpo en el vacío. El aislamiento del sistema físico en la mente nos permite manipular variables más allá de lo que físicamente es posible. La representación idealizada, no obstante, conecta con el mundo real ya que ha sido creada y controlada a partir de él.

## **LAS CONCLUSIONES E IMPLICACIONES QUE SE DERIVAN DE SU ESTUDIO**

El panorama que acabamos de perfilar tiene múltiples implicaciones tanto para la filosofía de la ciencia, como para la historia de la ciencia, la psicología y la enseñanza de las ciencias. Particularmente, en el caso de la educación científica, la autora pone

de relieve que existe un interés creciente por aunar esfuerzos conjuntamente desde la psicología, filosofía e historia de la ciencia para comprender cómo aprenden ciencias los estudiantes y ayudarles en su proceso de aprendizaje. En este sentido, cualquier teoría del cambio conceptual debería contemplar el “descubrimiento” científico como un proceso en el cual los científicos activamente construyen representaciones mediante el empleo de procedimientos de resolución de problemas que están en un continuo junto con aquéllos que se emplean en la resolución de problemas ordinarios. Con tal concepción “construcciónista” del descubrimiento, la actividad cognitiva del científico se convierte en algo directamente relevante en el aprendizaje. Los procesos históricos proporcionan un modelo para la actividad de aprendizaje en sí misma, y por tanto tienen un potencial para asistir a los estudiantes representaciones de las teorías científicas existentes. La historia de la ciencia se convierte, en este dominio, no en un repositorio de estudios de caso sino, sobre todo, en estrategias de conocimiento que pueden ayudar a los estudiantes a construir su conocimiento. En este sentido, puede resultar sugerente la idea de diseñar materiales didácticos que recurran a los cuadernos de notas de los científicos, a sus diarios personales, a las cartas, etc., como instrumentos de enseñanza, por supuesto con las adaptaciones necesarias que se requieran para trasladarlas a un contexto escolar.

En resumen, pues, representaciones analógicas, representaciones visuales y experimentos mentales suponen formas complejas de razonar por parte de los científicos que integran varias formas de información –proposiciones, modelos y ecuaciones- dentro de modelos mentales. Y asimismo deben suponer herramientas de interés para el aprendizaje de los alumnos.

## REFERENCIAS

- ACEVEDO, J.A. (2004). *El papel de las analogías en la creatividad de los científicos: la teoría del campo electromagnético de Maxwell como caso paradigmático de la historia de las ciencias*. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 1(3), pp. 188-205. En línea en: <http://www.apac-eureka.org/revista>
- GILBERT, R. y REINER, M. (2000). Thought experiments in science education: potential and current realization. *International Journal of Science Education*, 22(3), 265-283.
- NERSESSIAN, N. (1992). How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. En Giere, R. N. (ed.) *Cognitive Models of Science*. University of Minnesota Press. Minneapolis, MN. 3-45.
- NERSESSIAN, N. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. En L. Magnani, N.J. Nersessian y P Thagard. *Model-based reasoning in scientific discovery*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York
- NERSESSIAN, N. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. En P. Carruthers, S. Skitch y M. Siegal (eds.), *The cognitive basis of science*, Cambridge University Press. N.Y.

OLIVA, J.M<sup>a</sup> (2004 a). *El papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo de sistema solar (primera parte)*. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1(3), pp. 31-44. En línea en: <http://www.apac-eureka.org/revista>

OLIVA, J.M<sup>a</sup> (2004 b). *El papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo de sistema solar (segunda parte)*. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1(3), pp. 167-188. En línea en: <http://www.apac-eureka.org/revista>

REINER, M. y GILBERT, J.K. (2000). Epistemological resources for thought experimentation in science learning. *International Journal of Science Education*, 22(5), 489-506.

José María Oliva

---

[1] Si se prefiere, del cambio representacional.

[2] Como es el caso, por ejemplo, de los sueños de Kekulé, de la anécdota de la manzana de Newton o del famoso "eureka" de Arquímedes

[3] Nosotros lo llamaríamos un modelo del cambio conceptual como "caja negra".

[4] De hecho sitúa su aportación como ampliación de los trabajos de Johnson-Laird, que se limitan a procesos inductivos y deductivos, contemplándose aquí también los procesos de tipo creativo.

[5] En estas mismas páginas el lector interesado puede encontrar algunos trabajos al respecto (Oliva, 2004 a,b; Acevedo, 2004).

[6] En el ámbito específico de la educación científica, el tema de los experimentos mentales ha sido abordado por autores como Gilbert y Reiner (Gilbert y Reiner, 2000; Reiner y Gilbert, 2000).