



Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica

Scientific models: meaning and role in scientific practice

Modelos científicos: significado e papel na prática científica

José Antonio Acevedo-Díaz¹

Antonio García-Carmona²

María del Mar Aragón-Méndez³

José María Oliva-Martínez⁴

Recibido: mayo de 2017

Aceptado: agosto de 2017

Para citar este artículo: Acevedo-Díaz, J.A, García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M, M., y Oliva-Martínez, J.M. (2017). Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. *Revista Científica*, 30 (3), 155-166. **Doi:** <https://doi.org/10.14483/23448350.12288>

Resumen

El propósito de este artículo es contribuir a una mejor comprensión de los modelos científicos como componentes clave de la naturaleza de la ciencia. Para ello se aborda, en primer lugar, el significado epistemológico de los modelos científicos y su papel en la práctica científica. A continuación, se trata la función de los modelos científicos como mediadores entre una teoría y el mundo real, la cual se relaciona con el carácter parcialmente autónomo de los modelos respecto de ambos. Se incluyen varios ejemplos de modelos científicos para ilustrar la exposición sobre el funcionamiento de los modelos científicos. El artículo concluye con una breve referencia a las concepciones epistemológicas semanticista e instrumentalista sobre los modelos, que discurren paralelas al debate clásico entre el realismo y el pragmatismo acerca de la interpretación de las teorías científicas.

Palabras clave: modelos científicos; modelización; práctica de la ciencia; semanticismo; instrumentalismo.

Abstract

This article aims to contribute to a better understanding of the scientific models as a key component of the nature of science. For this, firstly the epistemological meaning of the scientific models and their role in the scientific practice are discussed. Secondly the function of the scientific models as intermediaries or mediators between theory and real world is addressed. This function is based on the partially autonomous character of the scientific models with regard to the latter. In order to illustrate the exposition of it various examples are included. The article concludes with a brief reference to both the semanticist and instrumentalist epistemological conceptions regarding the models, which run parallel with the

¹. Inspector de Educación jubilado. Huelva, España. Contacto: ja.acevedodiaz@gmail.com

². Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad de Sevilla, España. Contacto: garcia-carmona@us.es

³. Departamento de Didáctica, Universidad de Cádiz, España. Contacto: mariadelmar.aragon@uca.es

⁴. Departamento de Didáctica, Universidad de Cádiz, España. Contacto: josemaria.oliva@uca.es

classical debate between realism and pragmatism around the interpretation of scientific theories.

Keywords: scientific models; modelling; scientific practice; semanticism; instrumentalism.

Resumo

O objetivo deste artigo é contribuir para uma melhor compreensão dos modelos científicos como um dos principais componentes da natureza da ciência. Para isso, em primeiro lugar, discute-se o significado epistemológico dos modelos científicos e o seu papel na prática científica. Posteriormente, aborda-se a função dos modelos científicos como intermediários ou mediadores entre a teoria e o mundo real. Tal função é baseada no caráter parcialmente autônomo de ambos. Para ilustrar essa discussão, vários exemplos de modelos científicos são introduzidos. O artigo conclui com uma breve referência às concepções epistemológicas semanticistas e instrumentistas relativas aos modelos, que ocorrem paralelamente ao debate clássico entre realismo e pragmatismo em torno da interpretação de teorias científicas.

Palavras-chaves: modelos científicos; modelagem; prática científica; semanticismo; instrumentalismo.

Introducción

Los modelos y la modelización tienen una importancia clave en muchos contextos científicos. Constituyen uno de los principales instrumentos de la ciencia moderna⁵ y son esenciales en la práctica científica, pues sirven para aprender sobre las teorías científicas y el mundo. Aunque los modelos no se ajusten con perfección a todos los detalles del objeto al que se refieren, pueden proporcionar una información útil y profunda sobre su funcionamiento (Giere, 1999a).

Los científicos dedican mucho tiempo a construir, probar, comparar y revisar modelos; a su vez, numerosos artículos de ciencia introducen, aplican e interpretan estos instrumentos valiosos.

Por tanto, una parte significativa de la investigación científica se centra en los modelos más que en la realidad misma, porque al estudiar un modelo se pueden determinar hechos y descubrir rasgos del sistema que el propio modelo representa.

El significado de modelo científico ha sido discutido —y se sigue debatiendo aún— por filósofos de la ciencia, psicólogos, científicos y educadores, entre otros. Por ejemplo, los filósofos de la ciencia reconocen la importancia de los modelos cada vez más e investigan sus diversas funciones en la práctica científica. Como resultado de esta labor se citan distintos tipos de modelos —no excluyentes entre sí— en la bibliografía de filosofía de la ciencia, tales como: teóricos, exploratorios, explicativos, idealizados, heurísticos, instrumentales, imaginarios, fenomenológicos, icónicos, matemáticos, computacionales, formales, analógicos, etc.

La filosofía de la ciencia se plantea preguntas y reflexiona sobre los modelos científicos de naturaleza ontológica (¿qué son modelos?), epistemológica (¿cómo se construyen los modelos?, ¿qué y cómo se aprende con y de ellos?) y semántica (¿cuál es la función representativa de los modelos?), entre otras.

Los estudios epistemológicos, históricos y sociológicos de la ciencia de las últimas décadas han permitido una comprensión de la naturaleza de la ciencia cada vez más próxima a la práctica científica real, en la que los modelos tienen un papel central. En palabras de Matthews:

En los últimos cincuenta años, historiadores y filósofos de la ciencia han dedicado mucho tiempo a documentar y comprender el papel de los modelos en la ciencia y las ciencias sociales. Estos estudios han llevado a los académicos a examinar asuntos relacionados con los modelos tales como la naturaleza de las teorías científicas, el status de las hipótesis,

⁵. La importancia de los modelos en la generación del conocimiento científico ha sido puesta de manifiesto muchas veces de forma explícita por los propios científicos; por ejemplo, Pauling, Watson y Crick, entre otros (Acevedo-Díaz y García-Carmona, 2016; 2017).

el papel de las metáforas y las analogías en las explicaciones científicas, los experimentos mentales en la ciencia y la centralidad de la idealización para la articulación, aplicación y evaluación de los modelos. (2012, p. 20)

Según Adúriz-Bravo y Ariza (2014), todo esto se debe, en parte, al giro modelístico en los estudios meta-científicos, es decir, a: “la actual preferencia por estudiar y entender las teorías científicas a través de sus modelos, [...] [en vez] del abordaje tradicional de mirar sus leyes” (Adúriz-Bravo y Ariza, 2014, p. 26). Sin embargo, a pesar del gran interés generado por los modelos científicos, y de lo que se ha avanzado desde entonces, aún hay muchas lagunas en la comprensión sobre qué son y cómo funcionan (Cassini, 2016).

En efecto, los significados y el papel que se suelen asignar a los modelos científicos en la práctica científica son tan diversos y numerosos que bien se les podría aplicar la expresión tan común en inglés “*A rose by any other name*”⁶ (literalmente “Una rosa por cualquier otro nombre”). El carácter ambiguo o polisémico de la idea de modelo, presente incluso dentro de la actividad científica en las diferentes disciplinas, parece estar directamente relacionado con este galimatías (Adúriz-Bravo y Ariza, 2014; Adúriz-Bravo, Labarca y Lombardi, 2014; Cassini, 2016; Gutiérrez, 2014), el cual induce a una comprensión incompleta, cuando no errónea, del significado de modelo científico⁷. Esto sucede incluso en el caso de científicos en activo. La distinción entre modelo y teoría poco reflexionada, y más bien tosca, que suelen hacer los científicos es

considerar a un modelo científico como menos seguro o más incompleto que una teoría en aspectos importantes⁸.

Para concluir esta introducción, se muestra una lista de aspectos sobre los modelos científicos, elaborada por Oh y Oh (2011), que puede servir de guía sintética para lo que se desarrollará a lo largo del artículo:

1. *Significado de modelo científico.* Un modelo puede definirse como una representación de un objetivo (el referente). Los referentes representados por los modelos pueden ser diversas entidades tales como objetos, fenómenos, procesos, ideas o sistemas. Un modelo científico también es un puente para conectar una teoría científica con un fenómeno, porque ayuda al desarrollo de la teoría desde los datos y la pone en relación con el mundo natural.
2. *Propósitos de la modelización.* El papel de un modelo es describir, explicar y predecir fenómenos naturales, así como la comunicación de ideas científicas.
3. *Funcionalidad de los modelos científicos.* El funcionamiento de los modelos científicos, como instrumentos para pensar y comunicarse, se facilita mediante la expresión de modelos con recursos semióticos no lingüísticos, usando analogías y permitiendo simulaciones mentales y externas al modelo.
4. *Multiplicidad de modelos científicos.* Debido a que los científicos tienen diferentes ideas sobre el objetivo y su funcionamiento, se pueden desarrollar diversos modelos científicos para estudiarlo. Ello también es posible porque hay

⁶. El origen de esta expresión está en el acto segundo, escena segunda, de la obra de Shakespeare “Romeo y Julieta”. En concreto, cuando Julieta le dice a Romeo desde el balcón: “*What’s in a name?, that which we call a rose by any other name would smell as sweet*” (traducción libre “¿Qué hay en un nombre?, lo que llamamos rosa sería igual de fragante con cualquier otro nombre”).

⁷. Para intentar superar las múltiples características encontradas en los diversos significados de modelo científico que aparecen en la bibliografía, Gutiérrez (2014) sugiere definirlos desde una perspectiva ontológica basada en Bunge (1972; 1973).

⁸. En una serie de entrevistas realizada por Wong y Hodson (2009) a científicos, un físico especializado en alta energía concebía los modelos como teorías menos robustas y con menor grado de rigor: “Para nosotros [los físicos que investigan en alta energía], los modelos son una entidad menos rigurosa que las teorías. Cuando hay más evidencias para apoyar un modelo, podría llamarse una teoría.” (Wong y Hodson, 2009, p. 123). Como en otras ocasiones, se constata que, aunque una comprensión inadecuada sobre la naturaleza de la ciencia (de la naturaleza de los modelos científicos en este caso) no afecte a la capacidad de los científicos para hacer sus investigaciones, no es lo mismo investigar en ciencias que reflexionar sobre la naturaleza de las investigaciones científicas que se realizan (Acevedo-Díaz, 2017).

una variedad de recursos semióticos disponibles para construir modelos científicos.

5. *Limitaciones de los modelos científicos.* Los modelos científicos solo se refieren a un aspecto específico del objetivo, con un grado de precisión limitado. Por tanto, pueden ser necesarios varios modelos para proporcionar una explicación más completa del objetivo.
6. *Cambios en los modelos científicos.* Los modelos científicos se prueban conceptual y empíricamente, de modo que pueden cambiar durante el proceso de desarrollo del conocimiento científico.

Propósito

El objetivo de este artículo es contribuir a aclarar, en lo posible, el significado de modelo científico y su funcionamiento en la práctica científica, teniendo en cuenta que tanto los modelos como los procesos de modelización son aspectos esenciales de la naturaleza de ciencia. Por tanto, no se tratarán cuestiones relacionadas con la modelización en la enseñanza de la ciencia que, sin duda, es algo de gran interés (Adúriz-Bravo, Labarca y Lombardi, 2014), pero diferente a lo que aquí se pretende y aborda⁹. La aplicación más apropiada del contenido de este artículo en la educación científica sería, pues, contribuir a la mejora de la comprensión de la naturaleza de los modelos científicos (Acevedo-Díaz y García-Carmona, 2016; Matthews, 2007 y 2012; McComas, 1998).

Los modelos científicos desde la epistemología de la ciencia

Para Adúriz-Bravo y Ariza (2014), entre algunos otros, la corriente representacional o modelística de la concepción semanticista proporciona uno de los enfoques más fructíferos de las últimas décadas en el estudio epistémico de la ciencia. En efecto, desde la década de 1980 el semanticismo ha

acometido con extensión y profundidad el tratamiento epistemológico de las teorías mediante sus modelos y ha realizado análisis bastante detallados respecto a asuntos como los siguientes (Adúriz-Bravo y Ariza, 2014, p. 28):

1. Los diversos usos y caracterizaciones de la noción de modelo.
2. El papel de los modelos en la identidad de las teorías.
3. Su función representacional, analógica y mediadora entre las teorías y el mundo.
4. Su estructura particular y el lugar que ocupan dentro de las teorías científicas.
5. La pertinencia de identificar tipologías de modelos.
6. La relación de los modelos científicos con las teorías, las leyes, los sistemas y los fenómenos.

Adúriz-Bravo y Ariza (2014, p. 29) destacan también cuatro rasgos epistemológicos centrales de los modelos teóricos en su funcionamiento:

1. Modelos a partir de la teoría y los datos empíricos.
2. Modelos para unas determinadas finalidades y valores.
3. Analogías teóricas respecto de la realidad.
4. Mediadores entre la teoría y los datos empíricos.

Desde una perspectiva semanticista representacional, Giere (1999a) se refiere a los modelos científicos de la manera siguiente:

El concepto fundamental de mi comprensión sobre la práctica científica es el de modelo. Para mí, los modelos son las entidades representacionales primarias de la ciencia. Afirmo que los científicos suelen usar modelos para representar los aspectos del mundo. Los tipos de modelos científicos incluyen modelos físicos a escala y representaciones diagramáticas, pero los modelos más interesantes son

⁹ Véase al respecto el número especial de *Science & Education*, 16(7-8), 2007, titulado *Models in Science and in Science Education*.

los modelos teóricos. Estos son objetos abstractos, entidades imaginarias cuya estructura podría o no ser similar a los aspectos de los objetos y procesos del mundo real. Los científicos son más propensos a hablar del ajuste entre sus modelos y el mundo, una terminología que adopto con satisfacción. (1999a, p. 3)

Según Giere (2004), un aspecto relevante de los modelos científicos es su capacidad para representar aspectos del mundo: “Los científicos usan modelos para representar aspectos del mundo con diversos propósitos. Desde este punto de vista, los modelos son instrumentos primarios de representación (aunque no los únicos) en las ciencias” (p. 747). Esta capacidad de los modelos reside en que “[...] están diseñados para que sus elementos puedan identificarse con características del mundo real” (Giere, 2004, p. 747).

Y, como señalan Adúriz-Bravo y Ariza:

La relación entre la teoría y el mundo o, más precisamente, la relación específica entre los modelos de la teoría y el mundo, es para Giere una relación de “parecido de familia” a la Wittgenstein, que él llama técnicamente “relación de similaridad”. Los modelos estarían conectados entre sí y a la realidad a través de relaciones analógicas de similaridad. Ahora bien, para Giere, las teorías no solo se componen de “familias de modelos”, su otro constituyente fundamental son entidades que permiten establecer el alcance de la relación entre los modelos y los sistemas reales. Tales entidades son entidades lingüísticas, denominadas por él hipótesis teóricas. (2014, p. 31)

Por su parte, Bunge (1972; 1973) asigna dos funciones esenciales a los modelos científicos: explicación y predicción del fenómeno, que también son características de las teorías científicas (Acevedo, 2017). Prácticamente la totalidad de las escuelas epistemológicas están de acuerdo con ambas funciones. Además de estas dos, Bunge añade la evaluación de teorías científicas, ya que estas solo se

pueden contrastar si se aplican a sistemas concretos; esto es, no son directamente contrastables. De este modo, un modelo científico conecta la teoría con los fenómenos del mundo físico. Sin embargo, esta función no es esencial, pues no se puede aplicar cuando no hay disponible una teoría científica (objeto) que sirva de referente al modelo científico (e.g., cambio climático, astrofísica, etc.). Los modelos que los científicos construyen para abordar estos casos se denominan a veces “modelos sustitutos”.

Esta sección finaliza haciendo mención especial a la cuarta característica epistemológica clave de los modelos científicos, indicada más arriba por Adúriz y Ariza (2014): su papel mediador entre la teoría y los datos empíricos, o entre la teoría y el mundo real. Este papel instrumental de los modelos ha sido abordado con amplitud por Morrison y Morgan (1999), sosteniendo que ello es posible gracias a que estos son autónomos parcialmente respecto de la teoría y del mundo real. Estas dos filósofas de la ciencia han desarrollado su tesis planteando, respondiendo y ejemplificando una serie de preguntas sobre los modelos científicos, que incluyen cuatro elementos básicos de la descripción que defienden de los modelos; a saber: 1) cómo se construyen, 2) cómo funcionan, 3) qué representan y 4) cómo se aprende con ellos. Tal y como las autoras concluyen:

La implicación de nuestra investigación es que los modelos no se deben considerar supeditados a las teorías y los datos en la producción del conocimiento. Junto con los instrumentos de medida, los experimentos, las teorías y los datos, son uno de los ingredientes esenciales de la práctica de la ciencia. Tampoco deberían contemplarse como “teorías preliminares” [...]. (Morrison y Morgan, 1999, p. 37)

Los modelos científicos como mediadores o intermediarios

Los modelos científicos no deberían contemplarse como derivados de una estructura teórica ya existente o como una simplificación de una teoría.

Tampoco deberían ser considerados como teorías preliminares de la ciencia. Estos puntos de vista dan una descripción muy limitada del papel de los modelos en la práctica científica, además de que puede ser inexacta en muchos casos. Los modelos científicos participan, junto con los instrumentos de medida, experimentos, teorías y datos, en los procesos básicos de la práctica de la ciencia.

Como se ha señalado anteriormente, una característica epistemológica clave de los modelos científicos es su papel mediador entre una teoría y los datos empíricos o, si se prefiere, entre una teoría y el mundo real; de ahí su capacidad para intervenir sobre uno u otro, o sobre ambos. Se tratará ahora este rasgo porque es central para la comprensión del funcionamiento de los modelos en la práctica científica. Para ello, se utilizará como marco general el estudio de Morrison y Morgan (1999)¹⁰, en el que se argumenta con amplitud y profundidad que los modelos son instrumentos de investigación mediadores entre una teoría y el mundo. Esta perspectiva asume, pues, que los modelos funcionan en la actividad científica con cierta autonomía respecto de estos dos últimos. Los elementos que contribuyen a esta naturaleza parcialmente autónoma de los modelos están relacionados con:

1. *Construcción*. Los modelos se construyen a partir de un conjunto de elementos de la realidad modelada y de la teoría, pero también de otros elementos externos que les dotan de cierta independencia parcial respecto de la teoría y el mundo.
2. *Funcionamiento*. Los modelos son instrumentos que adoptan formas distintas (modelos teóricos, icónicos, matemáticos, analógicos, heurísticos, entre otros). Sea cual sea el tipo de modelo que se considere, tienen funciones diversas relacionadas con su capacidad de intervención señalada. Como instrumentos, son

independientes del objeto sobre el que operan (teorías o el mundo), pero a la vez se relacionan con este de alguna manera, por lo que la autonomía solo puede ser parcial, tal y como se ha indicado antes. Los modelos también se utilizan a menudo como instrumentos para experimentar o explorar sobre teorías ya existentes; por ejemplo, un modelo se puede usar para corregir una teoría. Por último, hay modelos que funcionan directamente como instrumentos para experimentar.

3. *Capacidad de representación*. Esta permite el funcionamiento instrumental de un modelo y también enseña sobre lo que representa (una teoría o el mundo). Sin embargo, un modelo es solo una representación de una parte del objeto y a menudo se necesita un conjunto de modelos, a veces inconsistentes entre sí, para dar cuenta de las diversas características y propiedades del objeto.
4. *Papel en el aprendizaje*. Los modelos pueden actuar como instrumentos potentes de aprendizaje, pues son a la vez fuente y medio de conocimiento. El aprendizaje puede tener lugar en dos etapas del proceso: 1) en la construcción del modelo y 2) durante su uso; aunque cabría añadir también: 3) durante su evaluación y revisión, la cual dota al modelo de un carácter dinámico y evolutivo. Cuando se construye un modelo se crea un tipo de estructura representativa y se desarrolla el pensamiento científico. Asimismo, cuando se utiliza un modelo se aprende sobre el objeto que representa.

Ejemplos de modelos científicos

En lo que sigue se exponen varios ejemplos para ilustrar los cuatro elementos anteriores, señalándose en cursiva los principales aspectos recogidos en ellos. Los lectores pueden hacer lo mismo con

¹⁰. Este estudio ha sido citado con frecuencia, tanto por filósofos de la ciencia (e.g., Giere, 1999b; 2004) como por educadores de ciencia (e.g., Adúriz-Bravo, Labarca y Lombardi, 2014; Justi, 2006).

otros ejemplos que les resulten más familiares o próximos a su especialidad.

El modelo del péndulo simple

Un péndulo se puede usar para medir la aceleración de la gravedad con una precisión de cuatro cifras significativas. Para ello, hay que elaborar un modelo ideal (péndulo simple)¹¹ que no se deriva de la teoría newtoniana por completo, ni representa con exactitud a un péndulo real. Más bien, se basa en un conjunto de decisiones del modelado que simplifican la matemática y la física de un péndulo real, idealizándolo. La teoría no proporciona un algoritmo a partir del cual construir el modelo y establecer todas las decisiones del modelado (*autonomía*). La modelización implica simplificaciones y aproximaciones, que tienen que decidirse independientemente de los requisitos teóricos o de las condiciones de los datos. A partir de este modelo de péndulo ideal se van haciendo correcciones para las diferentes fuerzas que actúan sobre las diversas partes del péndulo real. Una vez hechas estas, el modelo del péndulo es una aproximación razonable al sistema real (*funcionamiento instrumental*).

Aunque sea necesaria cierta autonomía, también tiene que existir alguna relación con la teoría. El modelo del péndulo ideal funciona como un modelo de la mecánica newtoniana que describe un movimiento armónico. Asimismo, representa ciertos tipos de movimientos que son descritos por la teoría y producidos por un péndulo real (*capacidad de representación*). En este sentido, también es un modelo del objeto físico.

En resumen, el modelo del péndulo simple representa, en sus detalles, la teoría y el mundo (péndulo real), aunque sea parcialmente independiente de ambos, y funciona como un instrumento autónomo que permite hacer cálculos correctos en las mediciones para encontrar información sobre el mundo (la aceleración gravitatoria en algún lugar).

Los modelos mecánicos del éter en el electromagnetismo

El éter era un medio imponderable e inobservable, pero rígido y elástico. La hipótesis de su existencia fue establecida en óptica (“éter lumínico”) por el físico holandés Huygens, contemporáneo de Newton. Esta idea quedó eclipsada en su época por la teoría corpuscular de la luz de Newton hasta que fue retomada por algunos científicos del siglo XIX, como el inglés Young y el francés Fresnel. Thomson (Lord Kelvin) se basó en la óptica ondulatoria de Fresnel y su “éter óptico” para el desarrollo de sus modelos mecánicos del “éter electromagnético”. Los trabajos del físico holandés Lorentz provocaron posteriormente que se abandonara la búsqueda de un mecanismo newtoniano para el “éter electromagnético”, pues su modelo de “éter inmóvil” eliminaba cualquier intento de explicación mecánica del campo electromagnético (Acevedo, 2004). El experimento de Michelson y Morley puso fin a la hipótesis del éter poco después, a finales del siglo XIX.

Los modelos mecánicos del hipotético “éter electromagnético”, desarrollados por Thomson y Fitzgerald durante la segunda mitad del siglo XIX, se usaron como *sustitutos de experimentos* reales sobre el éter, que eran imposibles de realizar. A partir de la publicación, en 1856, de su artículo “*Dynamical Illustrations of the Magnetic and Helicoidal Rotatory Effects of Transparent Bodies on Polarized Light*”, Thomson abandonó el uso de analogías heurísticas, sustituyéndolas por otras explicativas del mundo físico. Tal cambio se debió a su propósito de desarrollar un programa de investigación basado en teorías dinámicas de los fenómenos físicos; las cuales eran concebidas como aquellas en las que las fuerzas con origen en un sistema físico se explicarían mediante movimientos de los componentes internos del propio sistema. Esta decisión llevaría a Thomson a *construir*

¹¹. El hilo de este péndulo ideal es inextensible y sin masa. El cuerpo suspendido es puntual. Asimismo, su movimiento es armónico simple para oscilaciones pequeñas; es decir, cuando la amplitud de la oscilación es igual al seno de la misma.

y *evaluar* modelos mecánicos cartesianos del éter en el electromagnetismo durante más de tres décadas (Acevedo, 2004). Esto tuvo una notable influencia en los trabajos de Maxwell del campo electromagnético¹².

Los modelos del “éter electromagnético” proporcionaron una estructura mecánica que incorporó algunas propiedades mecánicas, conexiones y procesos supuestamente necesarios para la propagación de las ondas electromagnéticas. Como los modelos eran equivalentes a una *representación* del éter, su manipulación tenía el mismo estatus que un experimento y, si conseguía tener éxito, se consideraba que este era equivalente a una evidencia experimental de la existencia de las propiedades citadas antes. En otras palabras, la manipulación de estos modelos equivalía a la del “éter electromagnético” y, en este sentido, funcionaron como *instrumento de experimentación*. De este modo, Fitzgerald fue capaz de hacer *correcciones* a las ecuaciones de Maxwell mediante sus modelos mecánicos del “éter electromagnético”.

Los modelos del núcleo atómico

Existe una serie de modelos diferentes de la estructura del núcleo atómico para dar cuenta de los procesos nucleares, cada uno de los cuales es capaz de describir el núcleo de manera distinta e incompatible con los demás (Morrison, 2015). Así, Cassini señala al respecto que:

No existe todavía una teoría acerca de la interacción de los nucleones (protones y neutrones) que componen los núcleos de los átomos que pueda explicar o predecir todos los fenómenos experimentalmente conocidos en el dominio de la física nuclear. En vez de ello, hay una multitud de modelos diferentes, más de 30, cada uno de los cuales es exitoso para tratar acerca de algún aspecto del comportamiento de los núcleos atómicos. (2016, p.16)

Estos modelos son incompletos, pues solo *representan una parte pequeña* del comportamiento del núcleo atómico y las representaciones que hacen de la estructura nuclear suelen ser poco exactas (e.g., no tienen en cuenta ciertas propiedades de la mecánica cuántica). Así, el modelo de gota líquida es útil para *describir e interpretar* la producción de fisión nuclear de núcleos pesados y para *predecir* correctamente las masas y las energías de ligadura de los núcleos; mientras que el modelo óptico sirve de base para la *interpretación* de experimentos de dispersión de alta energía.

El modelo de gota líquida, propuesto por primera vez por George Gamow en 1930 y desarrollado por Bohr en 1935, considera al núcleo como una “gota” o “esfera” de fluido nuclear incompresible, el cual estaría compuesto por nucleones (protones y neutrones) que permanecen unidos por la fuerza nuclear fuerte. En cambio, el modelo óptico, empleado para *describir e interpretar* las reacciones nucleares, tiene su origen en la similitud que hay entre la difracción óptica de una onda plana por un disco opaco y la dispersión elástica nuclear. Cuando una onda plana de luz incide sobre un disco opaco con bordes bien definidos parte de la radiación es absorbida por el disco, mientras que otra parte genera un patrón de difracción como resultado del paso del haz de luz por las proximidades del disco. Análogamente, cuando un haz de núcleos incide sobre otro núcleo objetivo, parte de las partículas del haz son absorbidas dando lugar a reacciones nucleares inelásticas, mientras que otra parte genera un patrón de difracción correspondiente a la dispersión elástica nuclear.

Los diversos modelos del núcleo atómico no incorporan demasiados rasgos significativos (e.g., el tratamiento del núcleo por el modelo de la gota líquida se hace mediante la física clásica y prescinde de la estadística cuántica porque las propiedades cuánticas de cada nucleón no se tienen en cuenta). Sin embargo, sirven para *explorar* las

¹² Véase Acevedo (2004) para un recorrido histórico que muestra la creatividad de Maxwell en los procesos de sus investigaciones sobre el campo electromagnético, sus razonamientos analógicos y modelos mecánicos del “éter electromagnético”.

tecnologías citadas con éxito y lo hacen de manera *parcialmente independiente* del conocimiento teórico existente.

El abordaje de los procesos nucleares no se resuelve mediante un solo modelo, sino que se acude a uno u otro modelo en función de las preguntas que se planteen sobre el objeto de modelaje. Por tanto, se pone de manifiesto que, para un objeto real dado (el núcleo atómico en este caso), no se debería considerar un modelo determinado mejor que otro desde un punto de vista absoluto.

El modelo de la estructura molecular del ADN

Algunos científicos son mejores como constructores de modelos, mientras que otros lo son como experimentalistas. Watson (2000) reconoció en todo momento que los modelos tridimensionales de Pauling¹³ fueron su principal fuente de inspiración a la hora de decidir los tamaños, las formas y disposición espacial de las subunidades que conforman la molécula del ADN. Por el contrario, Franklin y Wilkins no estaban convencidos de que este método pudiera resolver la estructura del ADN, sin disponer previamente de datos radiológicos precisos y suficientemente claros para poder discutir las estructuras posibles.

En la elucidación de la estructura molecular del ADN, Rosalind Franklin investigó usando una metodología experimental cuidadosa, basada en la difracción de rayos X y un riguroso método analítico. En cambio, Watson y Crick lo hicieron mediante la construcción de modelos. Durante el proceso de modelización que siguieron tuvieron un gran fracaso inicial, a finales de 1951. Los numerosos errores químicos y estructurales del primer modelo de tres hélices, de Watson y Crick, fueron señalados por Rosalind Franklin y Gosling tras una *evaluación crítica* del modelo¹⁴. No obstante, el 28

de febrero de 1953, Watson y Crick consiguieron elucidar la estructura molecular de doble hélice del ADN, construyendo un modelo que respondía con toda la información disponible sobre el ADN. Como señala Giere (2002), la modelización física realizada por Watson y Crick resultó un “sistema cognitivo” más eficaz que el de radiografías y diagramas dibujados a mano por Rosalind Franklin. No obstante, es necesario recurrir a la historia real de este descubrimiento para conocer mejor los entresijos de por qué esto sucedió así. El lector interesado en la misma puede encontrar un relato suficientemente detallado en Acevedo-Díaz y García-Carmona (2016; 2017).

El modelo de Watson y Crick no solo *explicaba* la estructura del ADN, sino que permitía hacer *predicciones* para encauzar investigaciones futuras: “No se nos escapa que el apareamiento específico que postulamos sugiere inmediatamente un mecanismo de copia para el material genético.” (Watson y Crick, 1953a, p. 737). En efecto, del apareamiento de las bases nitrogenadas de la molécula se deducía que la doble hélice del ADN podía hacer copias de sí misma; si se abría, cada una de las cadenas podía servir de molde para la síntesis de la cadena complementaria.

En otro artículo publicado en *Nature* en mayo del mismo año, Watson y Crick (1953b) resaltaron, con más firmeza aún, el valor de su modelo de la estructura molecular del ADN por sus consecuencias para el desarrollo de la genética:

Recientemente propusimos una estructura [...] que, si es correcta, sugiere inmediatamente un mecanismo para su auto-duplicación [...]. Aunque la estructura no esté probada completamente hasta que se haya hecho una comparación más amplia con los datos de rayos X, tenemos suficiente confianza en su corrección general para discutir sus implicaciones genéticas. (p. 965)

¹³. Linus Pauling fue el gran impulsor del uso de la modelización en la elucidación de la estructura de moléculas químicas.

¹⁴. El propio Pauling propuso con Corey, hacia finales de 1952, otro modelo de tres hélices que resultó ser un fiasco completo. Los errores de este modelo sorprendieron a Watson y Crick al comprobar que los “genios” también pueden cometer graves errores.

En 1957, Meselson y Stahl demostraron que la molécula de ADN era capaz de duplicarse a sí misma. Las dos cadenas que la forman pueden separarse y cada una de ellas puede actuar como un patrón para la síntesis de la cadena complementaria. El resultado es la obtención de dos moléculas bihelicoidales idénticas, portadoras de una cadena de la molécula original y otra de nueva síntesis. Esto se conoce como replicación semi-conservativa del ADN; de este modo, la información genética puede transmitirse de generación en generación.

Este ejemplo del ADN ilustra bastante bien el *aprendizaje* con modelos científicos durante el proceso de *construcción, evaluación y uso*.

Epílogo

Como se dijo en la introducción, aún persisten muchas lagunas en la comprensión sobre qué son los modelos científicos y cómo funcionan en la práctica científica. Debido a que los modelos suscitan un gran interés entre los filósofos de la ciencia desde las últimas décadas siguen abiertos muchos frentes y los debates son continuos.

Es probable que a los lectores no se les haya escapado que, a lo largo del artículo, subyacen dos posiciones epistemológicas: la semanticista¹⁵ y la instrumentalista¹⁶ (Cassini, 2016), que se mueven paralelas al debate clásico entre el realismo y el pragmatismo sobre la interpretación de las teorías científicas (Vázquez *et al.*, 2001)¹⁷. Aun así, no es objetivo de este artículo desarrollar una discusión de ese tipo, que obligaría a recurrir a aspectos de

cierto nivel conceptual filosófico. Tan solo se expondrán brevemente ambas posiciones a continuación, a partir de lo señalado por tres autores argentinos.

Según Adúriz-Bravo (comunicación personal del 8-6-2017), ningún semanticista *sensu stricto* concibe los modelos totalmente independientes de las ligaduras del cuerpo teórico (esto es, de los principios generales y las leyes considerados en sentido amplio). Por el contrario, los instrumentalistas conciben un papel mediador de los modelos con una independencia total respecto de tal cuerpo teórico.

Accorinti y Martínez-González (2016) distinguen dos interpretaciones de las concepciones semanticistas: la fuerte o dura, y la débil o moderada. La primera afirma que la teoría se identifica con el conjunto de sus modelos¹⁸, mientras que la segunda sostiene que la teoría se presenta a partir de sus modelos, pero no se identifica con ellos¹⁹. De este modo, los modelos no serían más que aplicaciones a situaciones concretas de las teorías (es decir, mediadores entre teorías y fenómenos del mundo). Esta diferencia de interpretación no invalida la dependencia de los modelos respecto de la teoría de las posiciones semanticistas²⁰. Estos autores abogan por una concepción instrumentalista de los modelos científicos al señalar que: “[...] la independencia de los modelos respecto de las teorías no es meramente provisional y contingente, sino que adquiere un carácter conceptual en tanto que constitutiva del propio proceso de modelización.” (Accorinti y Martínez-González, 2016,

¹⁵. Véanse, por ejemplo, van Fraassen (1996), Giere (1988) y la revisión de Ariza, Lorenzano y Adúriz-Bravo (2016) sobre las distintas posiciones semanticistas.

¹⁶. Véanse, por ejemplo, Cartwright (1983; 1999), Morrison y Morgan (1999) y Suárez (1999).

¹⁷. El pragmatismo se fundó en los EE. UU. por C.S. Peirce en el siglo XIX. Fue popularizado por W. James y J. Dewey, quien lo llamó instrumentalismo. Rorty es un filósofo actual que ha desarrollado algunos de los puntos de vista de estos pensadores norteamericanos. Un instrumentalista es un antirrealista respecto a las teorías científicas, que afirma que estas no son más que instrumentos para organizar la descripción de los fenómenos y hacer inferencias. De otra forma, el componente teórico de la ciencia no describe la realidad y las teorías se consideran solo instrumentos útiles destinados a relacionar un conjunto de observables con otros.

¹⁸. En palabras de van Fraassen (1996, p. 66) “presentar [...] una teoría por medio de la identificación de una clase de estructuras como sus modelos”.

¹⁹. Estos autores no aclaran lo suficiente en qué consiste esta distinción tan sutil, ni qué filósofos sostienen las concepciones semanticistas que apuntan. Así, por ejemplo, en la nota anterior, van Fraassen se refiere a la vez a “presentar” e “identificar”.

²⁰. Más bien habría que decir dependencia del cuerpo teórico disponible, en vez de dependencia de la teoría.

p. 242). Hay que aclarar que esto no significa decir que los conocimientos teóricos disponibles no cumplan función alguna en la construcción de los modelos, pero sí se niega que haya una relación de dependencia total de los modelos respecto a aquellos. Es decir, los modelos se construyen de un modo (parcialmente) independiente de las teorías, aunque contengan elementos, leyes o principios relacionados con ellas.

En definitiva, aunque se admita una autonomía o independencia parcial de los modelos respecto de las teorías, los fundamentos epistémicos son diferentes en el semanticismo y en el instrumentalismo.

Referencias

- Accorinti, H. L. y Martínez-González, J. C. (2016). Acerca de la independencia de los modelos respecto de las teorías. *Theoria*, 31(2), 225-245. <https://doi.org/10.1387/theoria.15235>
- 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), 187-204.
- Acevedo-Díaz, J. A. (2017). Sobre leyes y teorías científicas. OEI, Divulgación y Cultura Científica Iberoamericana. Recuperado de: <http://www.oei.es/historico/divulgacion-cientifica/?Sobre-leyes-y-teorias-cientificas>, 19-4-2017. Disponible en <http://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?Sobre-leyes-y-teorias-cientificas>
- Acevedo-Díaz, J. A. y García-Carmona, A. (2016). Rosalind Franklin y la estructura del ADN: un caso de historia de la ciencia para aprender sobre la naturaleza de la ciencia. *Revista científica*, 27, 162-175. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.25.a2>
- Acevedo-Díaz, J. A. y García-Carmona, A. (2017). *Controversias en la historia de la ciencia y cultura científica*. Madrid: Los libros de la Catarata.
- Adúriz-Bravo, A. y Ariza, Y. (2014). Una caracterización semanticista de los modelos científicos para la ciencia escolar. *Bio-grafía*, 7(13), 25-34.
- Adúriz-Bravo, A., Labarca, M. y Lombardi, O. (2014). Una noción de modelo útil para la formación del profesorado de química. En C. Merino, M. Arellano y A. Adúriz-Bravo (eds.), *Avances en didáctica de la química: modelos y lenguajes* (pp. 37-49). Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- Ariza, Y., Lorenzano, P. y Adúriz-Bravo, A. (2016). Meta-Theoretical Contributions to the Constitution of a Model-Based Didactics of Science. *Science & Education*, 25(7-8), 747-773. <https://doi.org/10.1007/s11191-016-9845-3>
- Bunge, M. (1972). *Teoría y realidad*. Barcelona: Ariel.
- Bunge, M. (1973). *Method, Model and Matter*. Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-2519-5>
- Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/0198247044.001.0001>
- Cartwright, N. (1999). Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the BCS models of superconductivity. En M. S. Morgan y M. Morrison (eds.), *Models as mediators: Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 241-281). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.010>
- Cassini, A. (2016). Modelos científicos. En C. E. Vanney, I. Silva y J. F. Franck (eds.), *Diccionario interdisciplinar Austral*. Buenos Aires: Universidad Austral. Recuperado de: http://dia.austral.edu.ar/Modelos_cient%C3%ADficos
- Fraassen, B. C. Van. (1996). *La imagen científica*. México DF: Paidós.
- Giere, R. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226292038.001.0001>
- Giere, R. (1999a). *Science without laws*. Chicago: University of Chicago Press.

- Giere, R. (1999b). Using Models to Represent Reality. En L. Magnani, N. J. Nersessian y P. Thagard (eds.), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4813-3_3
- Giere, R. (2002). Models as Parts of Distributed Cognitive Systems. En L. Magnani, N. J. Nersessian y P. Thagard (eds.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (pp. 227-241). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0605-8_13
- Giere, R. (2004). How Models Are Used to Represented Reality. *Philosophy of science*, 71(5), 742-752. <https://doi.org/10.1086/425063>
- Gutiérrez, R. (2014). Lo que los profesores de ciencia conocen y necesitan conocer acerca de los modelos: aproximaciones y alternativas. *Biografía*, 7(13), 37-66. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia37.66>
- Justi, R. (2006). La enseñanza de las ciencias basada en modelos. *Enseñanza de las ciencias*, 24(2), 173-184.
- Matthews, M. R. (2007). Models in science and in science education: An introduction. *Science & Education*, 16(7-8), 647-652. <https://doi.org/10.1007/s11191-007-9089-3>
- Matthews, M. R. (2012). Changing the focus: From nature of science (NOS) to features of science (FOS). En M. S. Khine (ed.), *Advances in nature of science research* (pp. 3-26). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2457-0_1
- McComas, W. F. (1998). The principal elements of the nature of science: Dispelling the myths. En W. F. McComas (ed.), *The nature of science in science education: Rationales and strategies* (pp. 53-70). Dordrecht: Kluwer.
- Morrison, M. (2015). One phenomenon, many models: Inconsistency and complementarity. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42(2), 342-351. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2010.11.042>
- Morrison, M., y Morgan, M. S. (1999). Models as mediating instruments. En M. S. Morgan y M. Morrison (eds.), *Models as mediators: Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 10-37). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.003>
- Oh, P. S. y Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8) 1109-1130. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Suárez, M. (1999). The role of models in the application of scientific theories: epistemological implications. En M. S. Morgan y M. Morrison (eds.), *Models as mediators: Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 168-196). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.008>
- Vázquez, A., Acevedo, J. A., Manassero, M. A. y Acevedo, P. (2001). Cuatro paradigmas básicos sobre la naturaleza de la ciencia. *Argumentos de razón técnica*, 4, 135-176.
- Watson, J. D. (2000). *La doble hélice*. Madrid: Alianza.
- Watson, J. D. y Crick, F. H. C. (1953a). A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature*, 171, 737-738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>
- Watson, J. D. y Crick, F. H. C. (1953b). Genetical implications of the structure of deoxyribonucleic acid. *Nature*, 171, 964-967. <https://doi.org/10.1038/171964b0>
- Wong, S. L. y Hodson, D. (2009). From the horse's mouth: What scientists say about scientific investigation and scientific knowledge. *Science Education*, 93(1), 109-130. <https://doi.org/10.1002/sce.20290>

