

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIX JORNADAS

VOLUMEN 15 (2009)

Diego Letzen  
Penélope Lodeyro

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



## Modelos científicos: aproximaciones desde una simulación computacional

*Penélope Lodeyro\**

### Introducción

Hoy en día, muchos sistemas complejos son estudiados desarrollando modelos de su física subyacente en una computadora y utilizando diversas técnicas de simulación que permiten comprender mejor su comportamiento.<sup>1</sup> En una primera aproximación, puede decirse que la noción de “simulación computacional” refiere al proceso de construir, correr e inferir a partir de modelos computacionales.<sup>2</sup> A nuestros fines lo que interesa destacar es que las simulaciones se basan en modelos, incorporan presupuestos de modelos y, luego, producen ellas mismas modelos de los fenómenos. Además, en los estudios de simulación computacional, la construcción de estos modelos se lleva a cabo de modo explícito, es decir, las suposiciones de modelado son propuestas y analizadas por los mismos científicos.<sup>3</sup> Por ello, consideramos que ciertos elementos de la práctica de simulación pueden arrojar luz en torno al polisémico concepto de “modelo científico”. En particular, ceñiré mis estudios a la polémica que se ha venido desarrollando entre los enfoques epistemológicos sobre los modelos científicos de la concepción semántica y la concepción de los modelos como mediadores. Ambos enfoques difieren tanto en sus objetivos como en la metodología que emplean, pero brindan cada uno a su modo herramientas de análisis que pueden resultar útiles a la hora de establecer una caracterización fértil de los modelos científicos en el contexto de las simulaciones computacionales de sistemas físicos complejos. Por una parte, la noción de modelo estructural proveniente de la corriente semanticista resulta sensible a la jerarquía de modelos que comprende la simulación computacional (modelo teórico, modelo matemático, modelo computacional, modelo del fenómeno). Por otra parte, el enfoque de los modelos como mediadores aporta elementos fundamentales a nuestra comprensión de los modelos científicos en tanto denota especial interés por el proceso de elaboración de los mismos y por su funcionamiento en contextos específicos. Para ilustrar este punto, nos valdremos de la noción de “modelos ad hoc” desarrollada por Eric Winsberg (2001) en el marco de las simulaciones computacionales. Como veremos a través de un ejemplo -la simulación de los movimientos convectivos en un fluido- en las simulaciones computacionales, los modelos incorporan muchos elementos de la teoría con la que están conectados; sin embargo, es innegable, que utilizan un gran número de otros recursos: datos empíricos, modelos mecánicos, técnicas de cálculo, metáforas y ensayo y error. Estas apreciaciones están en el espíritu del proyecto de Morgan y Morrison de los modelos como mediadores. Sin embargo, los críticos de este enfoque han reprochado que no queda claro qué significa llamar “autónomos” a los modelos. Consideramos que, desde el contexto de las simulaciones computacionales, podemos esclarecer esta noción interpretando que cuando decimos que los modelos son autónomos, queremos enfatizar el hecho de que no hay un algoritmo para leer los modelos desde la teoría y que su construcción descansa en elementos creativo-inferenciales más que teórico-deductivos.

---

\* UNC. FONCyT

## **Enfoques Contrapuestos**

La concepción sintáctica, considera que una teoría científica es un conjunto de enunciados, cerrado con respecto a la relación de consecuencia lógica, cuya formulación precisa exige reflejar su estructura sintáctica en un cálculo axiomático.<sup>4</sup> Luego, los modelos son definidos como interpretaciones en las cuales el conjunto de axiomas es verdadero. La concepción semántica, motivada por las dificultades que la concepción heredada enfrentó en su tentativa de interpretar el vocabulario teórico de la ciencia en términos observacionales<sup>5</sup>, invierte esta jerarquía, definiendo la teoría en términos de un conjunto de modelos. Los modelos son n-uplas ordenadas, integradas por un dominio de entidades, relaciones, y operaciones sobre ese dominio de entidades. La perspectiva semántica quita preeminencia al lenguaje en que se formulan las teorías, pues no las considera entidades lingüísticas sino clases de estructuras conjuntistas del tipo lógico apropiado, definidas mediante un predicado conjuntista. A su vez, la relación entre los modelos de una teoría y los sistemas empíricos que representan, se describen en términos de algún morfismo. En líneas generales, se considera que un modelo científico es una estructura que representa un fenómeno si y solo si dicho fenómeno o sistema es estructuralmente isomórfico al modelo. Es decir, se asume la existencia de un conjunto de relaciones preservadoras de estructuras que vinculan representacionalmente al modelo y al fenómeno. Así, la interpretación de la teoría la proporcionan los modelos y no las reglas de correspondencia.

El hecho de que una teoría emplee conceptos carentes de correlato directamente observable en los resultados experimentales ha llevado a algunos autores como P. Suppes<sup>6</sup> a estipular una jerarquía en la familia de modelos. En el nivel más elevado sitúa la teoría a contrastar y sus modelos; a continuación, se ubican la teoría del experimento llevado a cabo para su contrastación y sus modelos. El tercer nivel lo ocupa la teoría de los datos y los modelos de los datos. Estos sólo incluyen la información experimental vinculada con los parámetros de la teoría a contrastar. Luego se ubica la teoría del diseño experimental y sus modelos, que contienen las consideraciones relativas al diseño experimental que pueden formalizarse pero que exceden los límites de la teoría a contrastar. Finalmente, encontramos la teoría de las condiciones *ceteris paribus*, que incluye las consideraciones intuitivamente relevantes sobre el diseño experimental que no pueden formalizarse y cuya relación con los modelos de los datos no puede explicitarse completamente. En cada nivel de esta jerarquía, la teoría cobra significado empírico a través de las conexiones formales con las teorías del nivel inmediato inferior. Con todo, esta concepción semántica parece incapaz de garantizar la semejanza estructural entre los modelos de datos y los fenómenos que las teorías correspondientes pretenden describir, pues las relaciones entre los modelos de la teoría de las condiciones *ceteris paribus* y los modelos de los demás niveles de la jerarquía suppesiana no pueden explicitarse formalmente ni evaluarse mediante tratamiento estadístico alguno.

Desde fines del siglo XX, diversos autores (Giere (1963), Hesse (1963), Cartwright (1983), Morgan y Morrison (1999)) rechazaron la convicción semanticista de que la relación entre los modelos de una teoría y los sistemas empíricos correspondientes consista en algún tipo de morfismo. En líneas generales, se enfatizó la materialidad de los modelos, se juzgó insostenible la idea de que "los modelos ya estén en las teorías" y se consideró que la actividad de elaborar modelos es más creativa y complicada que lo sugerido por la concepción semántica. Aunque

coinciden con esta concepción en asignar un papel prioritario a los modelos en el análisis epistemológico, destacan, en cambio, la importancia del proceso de elaboración de los modelos y del estudio de su funcionamiento en contextos específicos.

En particular, según Morrison y Morgan, el rasgo más importante de los modelos es su autonomía con respecto a las teorías y la evidencia empírica. Pues este carácter de *agentes autónomos* posibilita que funcionen como mediadores entre las teorías y el mundo.<sup>7</sup> Se entiende que los modelos son construidos a partir de una mixtura de elementos pertenecientes no sólo al dominio de la teoría, sino también a aquellos elementos que se encuentran fuera de dicho dominio. Ningún modelo es puramente teórico ni puramente fenoménico, sin importar el grado vincular que lo una con la teoría o con el fenómeno.

De este modo, los modelos no se encuentran situados en medio de una estructura jerárquica entre la teoría y el mundo, como consideraba la concepción semántica, sino en tensión con ambos extremos. Morgan y Morrison ven en su tesis de la autonomía una diferencia fundamental con respecto a la concepción semántica, pues consideran que este enfoque niega tal autonomía al establecer que todo modelo es modelo de alguna teoría.

### **Aproximaciones desde un caso de simulación computacional**

El término "simulación computacional" es utilizado para describir un amplio rango de aplicaciones. El caso que nos ocupa corresponde a las técnicas de simulación utilizadas para estudiar sistemas físicos complejos para los cuales se conocen las leyes físicas que los gobiernan pero, debido a la complejidad de las interacciones que desarrollan, no se saben sus consecuencias. Se trata de modelos confiables para los cuales sus ecuaciones no poseen solución analítica<sup>8</sup>.

Para solucionar este problema, los modelos dinámicos son transformados en un modelo computacional susceptible de ser implementado en una computadora digital. El paso de los modelos dinámicos al computacional requiere, como primera medida, convertir las ecuaciones diferenciales del primero en ecuaciones algebraicas discretas para las cuales distintas soluciones deben ser encontradas. A pesar de que esto resuelve la intratabilidad analítica, en el estudio de los sistemas complejos no lineales, suele darse el caso de que el nuevo modelo es computacionalmente intratable. La capacidad de cálculo de una computadora digital se ve comprometida a medida que mejoramos la precisión de cálculo. Uno de los motivos por lo cual sucede esto, especialmente en sistemas que involucran flujos de fluidos complejos, es que hay ciertos movimientos que ocurren a escalas muy pequeñas de espacio y tiempo que afectan de modo fundamental a la evolución del sistema como un todo. Por lo tanto, para representar los movimientos del sistema con cierto grado de precisión, deben emplearse algunos "trucos".

En relación a este punto, Eric Winsberg introduce la ventajosa noción de "modelos ad hoc" para referir a simplificaciones, eliminación de grados de libertad, sustitución de relaciones teóricas simples por complejas -y viceversa-, etc. todos resultados de la implementación de diversas técnicas de diseño para volver los modelos mejor manejables.<sup>9</sup> En esta categorización, los modelos ad hoc pueden ser eliminativos o creativos. El primer tipo de modelo sirve para determinar si los factores que han sido descartados en el diseño de la simulación son dables de ser negados; el segundo tipo consiste en hacer uso de algún "factor de improvisación" para compensar aquellos factores negados que, usualmente por su complejidad, no pudieron ser

modelados. Esta noción de modelos ad hoc enfatiza el hecho de que la construcción de la simulación computacional descansa en elementos creativo-inferenciales más que teórico-deductivos.

Para ilustrar estas ideas, Winsberg analiza la simulación computacional de los movimientos convectivos de los fluidos del gas en una estrella gigante roja (Winsberg 2001). Modelar esta clase de fluido requiere especiales consideraciones por parte de los científicos porque resulta particularmente complejo e inestable: pequeños cambios en temperatura, presión y densidad en una parte del sistema podrían generar turbulentos vórtices en otras, y pequeños remolinos en la superficie pueden llevar a grandes flujos muy conflictivos.<sup>10</sup> Por lo tanto, si el modelo pretende capturar los efectos a gran escala con cierta precisión, debe tener en cuenta los efectos a pequeña escala sin que se agobien las capacidades de cálculo en los cómputos.

Las ecuaciones del modelo son las ecuaciones de Euler para fluidos dinámicos. Su forma es relativamente simple, y se basan en las leyes de conservación de la masa, el momento y la energía. Estas ecuaciones incluyen efectos de compresibilidad pero ignoran la viscosidad que se encuentra presente en el flujo de gas de la estrella y que contribuye a la dinámica del sistema de manera crucial. Las fuerzas de fricción viscosas son tan pequeñas en comparación con las fuerzas inerciales que no suelen ser capturadas, ni siquiera por programas sumamente eficientes. El uso de la "ecuación no viscosa de Euler" ilustra el modelado ad hoc eliminativo. Un "fluido no viscoso" es un flujo de fluido donde las fuerzas de fricción viscosas son pequeñas en comparación con las fuerzas inerciales. Suponer que estas fuerzas viscosas pueden ser negadas permite simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes y construir las ecuaciones de Euler. Luego, el investigador debe hacer uso del modelado ad hoc creativo introduciendo algún factor que reemplace el que ha sido quitado, en este caso: la viscosidad en el flujo de gas de la estrella. Así describen la situación los científicos: "Los efectos viscosos, que actúan sólo a pequeña escala y son irresolubles por la grilla computacional, fueron aproximados por una viscosidad cuidadosamente formulada numéricamente. Esta viscosidad del esquema numérico disipa la energía cinética del movimiento del fluido en calor, como la viscosidad real del gas, pero en las escalas mayores de la grilla computacional. Esta viscosidad numérica fue cuidadosamente diseñada para restringir sus efectos disipativos al tamaño más pequeño posible consistente con la representación precisa del fluido no viscoso cercano en las escalas mayores." (Porter, Anderson, & Woodward 1998).

Finalmente, se elabora un modelo del fenómeno, para lo cual el investigador realiza una gran cantidad de suposiciones.<sup>11</sup> Este modelo es una representación múltiple que expresa el conocimiento, reunido de todas las fuentes relevantes, acerca del fenómeno. Puede consistir en relaciones matemáticas y leyes, imágenes —estáticas o dinámicas—, o descripciones textuales (Winsberg 1999, p. 11).

Este ejemplo ilustra el hecho de que las transformaciones de un modelo a otro, y el proceso inferencial en general, no pueden caracterizarse como deductivos, la noción de "modelos ad hoc" de Winsberg enfatiza este punto. La afirmación de Morrison y Morgan acerca de la autonomía de los modelos puede interpretarse en el contexto de este ejemplo en términos de que ni la teoría, ni la evidencia empírica proveen algoritmos para la elaboración de modelos. Sin embargo, esta

conclusión no avala estrictamente la "autonomía" sino la no determinación del modelo por la teoría.

Según hemos descripto, una simulación computacional, en términos generales, comprende un rico proceso inferencial que atraviesa una estructura jerárquica de diferentes tipos de modelos: mecánico, dinámico, ad hoc, computacional y del fenómeno implicados en nuestro caso. Cada paso en el proceso de modelar una simulación es un paso inferencial que va de un modelo a otro. A través de estos pasos se espera inferir nuevo conocimiento acerca del sistema simulado a partir del conocimiento teórico existente. El modelo principal surge directamente de la teoría, sin embargo, para poder hallar soluciones útiles y confiables, debe incorporarse el mencionado arsenal de idealizaciones, aproximaciones, e incluso en algunos casos falsificaciones concientes. Al final, el modelo utilizado para correr la simulación deviene de la teoría, pero se han introducido tantos elementos que lo que resulta es un híbrido. En este sentido, la teoría puede considerarse como una guía o como un elemento entre otros, más que como determinante de los modelos.

### **Consideraciones finales**

Las simulaciones computacionales para el tratamiento de sistemas complejos se construyen en un interjuego entre las teorías, los modelos, las estructuras matemáticas y diferentes aspectos heurístico-creativos. Hemos puesto de manifiesto, a través de la noción de "modelos ad hoc" de Winsberg, que aún en el caso en que la modelización es motivada teóricamente el proceso inferencial del paso de un modelo a otro no puede caracterizarse como deductivo. Partimos de la teoría, pero se van incluyendo otros elementos durante el proceso (aproximaciones, idealizaciones, información auxiliar, ensayo y error, falsificaciones, etc.) de manera que lo que resulta es un híbrido. En nuestro ejemplo, la principal dificultad a la hora de modelar los movimientos convectivos de los fluidos en los gases de una estrella consistía en capturar los efectos viscosos a pequeña escala. La inclusión de estos elementos en la transformación de los modelos teórico y matemático en modelos computacionales conlleva que para una adecuada valoración debamos considerar el contexto de toda la simulación más que sólo sus resultados.<sup>12</sup> Estas consideraciones han sido puestas bajo el rótulo de que ni la teoría ni los datos empíricos nos proveen de algoritmos para la construcción de los modelos.<sup>13</sup> Sin embargo, como hemos mencionado, esta conclusión no alcanza para sostener estrictamente la tesis de la "autonomía de los modelos" de Morgan y Morrison sino la no determinación del modelo por la teoría. Por otra parte, consideramos que la noción de modelo estructural puede constituir una poderosa herramienta de análisis para estos casos. Sin embargo, los abordajes con un alto grado de abstracción en la filosofía de la ciencia, como la concepción semanticista, corren el riesgo de descuidar el contacto con las prácticas científicas. Por ello, nuestro análisis se desliza de la semántica a la pragmática, porque no podemos comprender cómo la simulación logra su cometido sin el contexto del proceso de construcción. En este sentido, el enfoque funcionalista ha puesto bajo la lupa de la atención filosófica la práctica científica de *construir* modelos. Por ello, una buena caracterización de los modelos científicos, en torno a las simulaciones computacionales que estudian sistemas complejos, ha de capitalizar estos esfuerzos en un híbrido nutrido, por una parte por lo que proviene netamente de la teoría, y por otra de los procesos de idealización y aproximación<sup>14</sup>

---

## Notas

<sup>1</sup> Nuestro tratamiento no necesariamente será relevante para simulaciones que no recurran a una base en una teoría aceptada.

<sup>2</sup> No pretendemos brindar con ello una definición, este tema requiere especiales consideraciones y no lo abordaremos en este trabajo

<sup>3</sup> Cf. Oreskes, Shrader-Frechette & Belitz (1994) y Winsberg (2001).

<sup>4</sup> Caracterizar las teorías como entidades lingüísticas conlleva la dificultad de que cualquier modificación en la sintaxis de una axiomatización particular de una teoría (por ejemplo cambiar un axioma) supone cambiar de teoría. Además, los postulados elegidos en diferentes axiomatizaciones de una misma teoría no necesariamente se corresponden con sus supuestos básicos.

<sup>5</sup> Según esta concepción, la interpretación empírica de una teoría axiomatizada requiere reglas de correspondencia que vinculen los términos del lenguaje teórico con los del lenguaje observacional. Pero estas reglas sólo brindan una interpretación parcial de los términos teóricos. Además, tanto su estatus como su relevancia epistemológica fueron cuestionadas.

<sup>6</sup> Suppes, p (1988).

<sup>7</sup> Morrison M. & Morgan, M. (1999) p. 17 y 18.

<sup>8</sup> Son modelos para los cuales es imposible obtener ecuaciones cerradas que representen una solución exacta al conjunto de ecuaciones diferenciales que nos diga cómo se comportará el sistema a través del tiempo (modelos no-integrables).

<sup>9</sup> Winsberg (2001) p 444.

<sup>10</sup> *Ibidem* p 445.

<sup>11</sup> Winsberg detalla: "Dado que los investigadores estaban interesados principalmente en la envoltura de la estrella y no en el núcleo, éste fue tratado simplemente como una fuente de calor, sin contemplar la física interna. A su vez, el modelo del núcleo era mucho más grande (respecto a la envoltura) que el núcleo real, para acercarlo a la forma esférica sin alterar la estructura de la grilla de la simulación. El modelo también necesita dar cuenta de cómo se mueve el calor a través del sistema *via* conducción. Los modeladores asumen que el índice de difusión térmica depende sólo de la presión del gas, y pueden por lo tanto, tratarlo con relativa simplicidad. Finalmente, el modelo necesita dar cuenta de cómo se disipa la energía desde la superficie de la estrella. La física de este proceso es de hecho sumamente complicada, pero los investigadores estaban dispuestos a ofrecer un tratamiento mucho más simple del problema. Simplemente usaron la fórmula estándar para la radiación de los cuerpos negros y la aplicaron exclusivamente a aquellas parcelas del fluido que, basadas en las presiones calculadas, era probable encontrarlas lo suficientemente cerca de la superficie para ser capaces de irradiar el calor eficientemente." Winsberg (2001) p 447.

<sup>12</sup> Queda pendientes para próximas investigaciones abordar con mayor profundidad la representación de los modelos científicos y la validación de los resultados de simulación.

<sup>13</sup> Sin poder hacernos con un conjunto de reglas para asir su construcción, aún podemos concebirlos como una mixtura de criterios de construcción. A qué responden esos criterios será una pregunta que sólo podrá contestar el científico cuando trabaje sobre un modelo particular, afirmándose las fuertes ataduras entre la noción de modelo y pautas particulares de los científicos —o de las instituciones.

<sup>14</sup> Nótese que no pretendemos brindar con ello una teoría de los modelos científicos sino que nuestro aporte puede caracterizarse más bien como una contribución al estudio de su funcionamiento en contextos específicos. En este caso, en el contexto de las simulaciones computacionales de sistemas físicos complejos.

## Bibliografía

Hesse, M. (1963) *Models and analogies in science*. London, Sheed and Ward.

Morrison, M. & Morgan M. (eds) (1999) *Models as Mediators* Cambridge, Cambridge University Press.

Porter, David & P. Woodward (1994) *High-resolution simulations of compressible convection using the Piecewise-Parabolic Method*. The Astrophysical Journal 93 (Supplement) : 309-321.

Suppe, F. (ed) (1974) *The structure of scientific theories*. Urbana, University of Illinois Press.

Suppes, P. (1960) *A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences*. Synthese, 12, 1960.

Suppes, P. (1988) *Representation theory and the analysis of structure*. Philosophia naturalis, 25, 1988.

---

Winsberg, E (2001) *Simulation, models and theories : complex physical systems and their representations*. Philosophy of Science, 68, 2001.

Winsberg, E. (2003) Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World. Philosophy of Science 70, 2003.