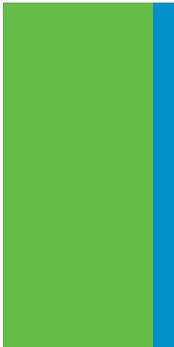


IDEALIZACIONES Y APROXIMACIONES EN LA FORMULACIÓN DE MODELOS: UNA JUSTIFICACIÓN PRAGMÁTICA

Dairon Alberto Arboleda Quintero



IDEALIZACIONES Y APROXIMACIONES EN LA FORMULACIÓN DE MODELOS: UNA JUSTIFICACIÓN PRAGMÁTICA

Dairon Alberto Arboleda Quintero



Idealizaciones y aproximaciones en la formulación de modelos: una justificación pragmática

© DAIRON ALBERTO ARBOLEDA QUINTERA

© Instituto Tecnológico Metropolitano -ITM-

Edición: diciembre 2014

ISBN: 978-958-8743-55-4

Hechos todos los depósitos legales

Publicación electrónica para consulta gratuita

Rectora

LUZ MARIELA SORZA ZAPATA

Directora Editorial

SILVIA INÉS JIMÉNEZ GÓMEZ

Comité Editorial

ALEJANDRO ROSALES VALBUENA, MSc., Colombia

SILVIA INÉS JIMÉNEZ GÓMEZ, MSc., Colombia

JAIME ANDRÉS CANO, PhD., Colombia

YOLANDA ÁLVAREZ RÍOS, MSc., Colombia

VIVIANA DÍAZ DÍAZ, Secretaria Técnica

Corrección de textos

LILA M. CORTÉS FONNEGRA

Diagramación

ALFONSO TOBÓN

Director de tesis

THOMAS MORMANN

Universidad del País Vasco

Facultad de Filosofía y Ciencias de la Educación

Editado en Medellín, Colombia

Instituto Tecnológico Metropolitano

Calle 73 No. 76A 354

Tel.: (574) 440 5197 • Fax: 440 5382

www.itm.edu.co

Las opiniones, originales y citas del texto son de la responsabilidad del autor. El ITM salva cualquier obligación derivada del libro que se publica. Por lo tanto, ella recaerá única y exclusivamente sobre el autor.

Arboleda Quintero, Dairon

Idealizaciones y aproximaciones en la formulación de modelos : una justificación pragmática / Dairon Arboleda Quintero. -- Medellín : Instituto Tecnológico Metropolitano, 2014.
250 p. -- (Investigación científica)

Incluye referencias bibliográficas
ISBN 978-958-8743-55-4

1. Filosofía de la ciencia 2. Modelos científicos 3. Idealización 4. Teoría científica I. Tít. II. Serie

501 SCDD 21 ed.

Catalogación en la publicación - Biblioteca ITM

Esta tesis va dedicada a mi madre, a mi esposa y a mi hijo, porque siempre me han acompañado en los triunfos y en las derrotas.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	11
INTRODUCCIÓN	12
1. LOS MODELOS EN EL CONTEXTO CIENTÍFICO	22
1.1 INTRODUCCIÓN	22
1.1.1 ¿Qué es un modelo?	23
1.1.2 ¿Los modelos se deben clasificar de acuerdo a su estructura, a su naturaleza o a la función que cumplen?	23
1.1.3 ¿Cómo se relacionan los modelos y las teorías científicas: cuáles son sus afinidades y diferencias?	23
1.2 ¿QUÉ ES UN MODELO?	24
1.3 ¿CÓMO SE CLASIFICAN LOS MODELOS CIENTÍFICOS?	33
1.4 ¿CÓMO SE RELACIONAN LOS MODELOS Y LAS TEORÍAS CIENTÍFICAS?	40
1.4.1 ¿Qué es una teoría científica?	40
1.4.2 ¿Cuál es la diferencia entre modelos y teorías científicas?	45
1.5 IDEALIZACIONES Y APROXIMACIONES EN LA FORMULACIÓN DE MODELOS	49
1.5.1 Idealizaciones en la formulación de modelos: ¿Ficciones útiles, verdades por convención o justificación empírica?	54
1.5.2 Confrontación entre un experimento simulado y un experimento real	63
1.5.3 Aproximaciones en la construcción y utilización de modelos	66
1.5.4 Idealizaciones y aproximaciones en la construcción de modelos: una justificación teórica	67
1.6 RECAPITULACIÓN	70
2. EL PAPEL MULTIFUNCIONAL DE LOS MODELOS EN LA CIENCIA	72
2.1 INTRODUCCIÓN	72
2.1.1 ¿Son modelos las analogías y metáforas?	73
2.1.2 ¿Los modelos representan, intervienen o realizan ambas funciones?	73
2.1.3 ¿Los modelos se construyen o se descubren?	74
2.2 ¿SON MODELOS LAS ANALOGÍAS Y METÁFORAS USADAS EN CIENCIA?	75
2.2.1 Metáforas y analogías en la ciencia	75
2.2.2 El valor didáctico de las metáforas y analogías	78
2.2.3 Cálculo de la constante de elasticidad de un resorte (k)	80
2.3 IDEALIZACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS: UN ENFOQUE FALSACIONAL DE LA REPRESENTACIÓN	87
2.3.1 El problema de los cumpleaños	94
2.3.2 Las evaluaciones de escogencia múltiple	96
2.3.3 El modelo CEP como representación interventiva	99

2.4	MODELOS DE LA CANTIDAD ECONOMICA DE PEDIDO (CEP)	99
2.4.1	Modelo CEP de compra sin déficit.	99
2.4.2	Modelo de producción sin déficit.....	101
2.4.3	Modelo CEP de compra con déficit. (Se permiten faltantes)	102
2.4.4	Modelo de producción con déficit	103
2.4.5	Modelo probabilístico con demanda variable y tiempo de anticipación (L) constante	104
2.5	EL QUINTO ELEMENTO EN LA CONCEPCIÓN DE GIERE	105
2.6	DETERMINACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS A PARTIR DE UN MODELO CONOCIDO.....	107
2.6.1	Aceleración de la gravedad	107
2.6.2	Ley de Ohm en circuitos eléctricos.....	109
2.6.3	Movimiento uniformemente acelerado.....	111
2.6.4	Medida del cero absoluto (temperatura) con un volumen constante de gas.....	112
2.6.5	Circuito eléctrico ($R - L$) en serie.....	114
2.7	OBTENCIÓN DE UN MODELO NUEVO A PARTIR DE UN MODELO CONOCIDO	115
2.8	DETERMINACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS ELABORANDO UN MODELO A PARTIR DE UN CONCEPTO CIENTÍFICO	119
2.8.1	Estimación del diámetro de una esfera usando el concepto de probabilidad	119
2.9	¿LOS MODELOS SE CONSTRUYEN O SE DESCUBREN?.....	121
2.9.1	Análisis dimensional	123
2.9.2	Péndulo simple	125
2.9.3	El tanteo gráfico en la búsqueda de modelos.....	128
2.10	RECAPITULACIÓN.....	133
3.	LEYES Y MODELOS EN LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA.....	135
3.1	INTRODUCCIÓN	135
3.2	¿QUÉ ES UNA LEY CIENTÍFICA?	138
3.2.1	¿Cómo diferenciar las leyes y las verdades accidentales?.....	140
3.3	EXPLICACIÓN EN MATEMÁTICA Y MATEMÁTICA EN LA EXPLICACIÓN.....	142
3.3.1	Modelos clásicos de explicación científica.....	142
3.3.1.1	Explicación nomológico-deductiva (DN)	143
3.3.1.2	Explicación inductivo-estadística (IS)	144
3.3.1.3	Modelo de relevancia estadística de Salmon (SR).....	144
3.3.1.4	El modelo mecánico causal de Salmon (CM) (1997)	146
3.3.1.5	El modelo unificacionista de Kitcher	146
3.3.1.6	Explicación y empirismo constructivo (van Fraassen).....	147
3.3.2	El papel de la matemática en la explicación científica.....	148
3.3.2.1	Así como en física se habla de explicación física de fenómenos físicos ¿se puede hablar de explicación matemática de enunciados matemáticos?.....	148
3.3.2.2	¿Puede la matemática jugar un papel explicativo a nivel empírico?.....	150

3.4 LAS CLÁUSULAS CETERIS PARIBUS: UNA ESTRATEGIA DE ELUCIDACIÓN Y NO DE PROTECCIÓN	157
3.4.1 ¿Cuál es el significado de <i>ceteris paribus</i> y su diferencia con abstracciones e idealizaciones?	158
3.4.2 ¿Hay genuinas leyes sociales?	160
3.4.3 Afinidades y divergencias entre la economía y las ciencias naturales.....	164
3.5 CAUSALIDAD Y MODELOS CAUSALES	169
3.5.1 Teorías clásicas acerca de la causalidad: ¿Están las causas conectadas a sus efectos?	170
3.5.2 Modelación causal: ¿Existen algoritmos que posibilitan descubrir relaciones causales?.....	176
3.6 RECAPITULACIÓN.....	180
4. EL PAPEL DE LA INDUCCIÓN EN LA FORMULACIÓN DE MODELOS	182
4.1 INTRODUCCIÓN	182
4.1.1 ¿Es la estadística clásica inductiva o deductiva?	183
4.1.2 ¿Es posible aprender inductivamente de la experiencia?	183
4.1.3 ¿Cuál es la metodología estadística más apropiada para la formulación de modelos?.....	183
4.2 ESQUEMAS BÁSICOS DE INDUCCIÓN Y PROBLEMAS ASOCIADOS A ESTA METODOLOGÍA	184
4.3 ¿ES LA ESTADÍSTICA CLÁSICA INDUCTIVA O DEDUCTIVA?.....	188
4.3.1 Obtención por inducción del modelo binomial.....	190
4.3.2 Obtención por inducción del modelo hipergeométrico	193
4.3.3 El teorema del límite central.....	194
4.4 ¿ES POSIBLE APRENDER INDUCTIVAMENTE DE LA EXPERIENCIA?	197
4.4.1 Argumentos a favor de la obtención de conocimiento inductivamente	202
4.4.2 Determinación de variables físicas a partir de medidas experimentales	204
4.5 ¿CUÁL ES LA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA MÁS APROPIADA: BAYESIANISMO-FRECUENTISMO?	206
4.5.1 Cuestionamientos al enfoque frecuentista	208
4.5.2 Viabilidad del uso del modelo bayesiano en la investigación científica	211
4.6 RECAPITULACIÓN.....	217
5. CONCLUSIONES	219
BIBLIOGRAFÍA	228

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Graduación del zoom de una cámara fotográfica	29
Figura 2. Diagrama de dispersión y recta de regresión	29
Figura 3. Modelo cuadrático.....	30
Figura 4. Modelo potencial.....	31
Figura 5. El modelo CEP (cantidad económica de pedido)	52
Figura 6. Representación gráfica del péndulo simple	53
Figura 7. Constante de elasticidad de un resorte (k)	81
Figura 8. Datos experimentales vs recta de ajuste	81
Figura 9. Diagrama de dispersión y las dos rectas extremas (1).....	84
Figura 10. Diagrama de dispersión y las dos rectas extremas (2).....	84
Figura 11. Diagrama de dispersión y las dos rectas extremas (3).....	85
Figura 12. Diagrama de dispersión y las dos rectas extremas (4).....	85
Figura 13. Modelo CEP de compra sin déficit.....	100
Figura 14. Modelo de producción sin déficit	101
Figura 15. Modelo CEP de compra con déficit	102
Figura 16. Modelo de producción con déficit.....	103
Figura 17. Modelo demanda probabilística.....	104
Figura 18. Determinación de la aceleración de la gravedad.....	108
Figura 19. Gráfica linealizada	110
Figura 20. Movimiento uniforme acelerado.....	111
Figura 21. Determinación gráfica del cero absoluto.....	114
Figura 22. Representación gráfica del lanzamiento de la aguja	116
Figura 23. Representación de los cortes como un área.....	117
Figura 24. Experimento probabilístico	120
Figura 25. Diámetro de la esfera	120
Figura 26. Gráfica periodo vs radio	130
Figura 27. Gráfica periodo vs radio al cuadrado	130
Figura 28. Gráfica periodo al cuadrado vs radio al cubo	131
Figura 29. Diagrama de dispersión y curva de ajuste	132
Figura 30. Gráfica regresión lineal.....	154
Figura 31. Diagrama Path	177
Figura 32. Teorema de Bayes.....	206
Figura 33. Aplicación Bayesianismo	216

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Medidas reales en la cámara fotográfica	28
Tabla 2. Criterios para diferenciar modelos y teorías	46
Tabla 3. Variación del período (T) de un péndulo como función de la longitud del hilo (L)	63
Tabla 4. Período en función de la longitud obtenido empíricamente.....	65
Tabla 5. Aproximación de $\text{Sen}\theta = \theta$ para ángulos pequeños.....	68
Tabla 6. Deformación (cm) para distintas masas (gr)	80
Tabla 7. Desviación estándar coeficientes de regresión	83
Tabla 8. Altura y tiempo de caída de un móvil 108	107
Tabla 9. Medidas de resistencia y de corriente	109
Tabla 10. Desplazamiento para distintos tiempos	111
Tabla 11. Valores experimentales de presión y temperatura.....	113
Tabla 12. Medidas de impedancia y frecuencia.....	114
Tabla 13. Resultados del experimento con el programa Cabri	117
Tabla 14. Datos simulados para hallar el valor de la constante k	127
Tabla 15. Los planetas y el radio promedio de la órbita	129
Tabla 16. Valores de los períodos reales y estimados.....	132
Tabla 17. Permutaciones de n elementos	152
Tabla 18. Medidas de edad y eficiencia para una máquina	153
Tabla 19. Tanteo tabular para distintos valores de Q	167
Tabla 20. Media (μ) y desviación estándar (σ) poblacional	195
Tabla 21. Medidas muestrales	196
Tabla 22. Bacterias por unidad de volumen	203
Tabla 23. Variación de presión de un gas con el volumen	205

AGRADECIMIENTOS

Son tantas las personas que hacen posible la cristalización de un proyecto como este, que con seguridad dejaré de mencionar a alguien que lo merece. De todas formas hay unos cuantos a quienes les agradezco profundamente su cooperación desinteresada:

Al profesor Thomas Mormann, por su gran dedicación como director del proyecto y sus oportunas y acertadas recomendaciones que me ayudaron a crecer como profesional y como persona.

Al doctor Andoni Ibarra, por su incansable labor para sacar adelante el proyecto compartido entre la UPV/EHU y el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia, y sus importantes aportes durante el desarrollo de mi trabajo.

A Inma Obeso y Nicanor Ursúa, por su gran cooperación y acompañamiento durante mi pasantía en San Sebastián.

A los compañeros del doctorado y a las directivas del ITM que me acompañaron desinteresadamente en este arduo proyecto.

A toda mi familia, de quienes recibí su apoyo para no desfallecer en el logro de las metas propuestas.

A todos muchas gracias.

INTRODUCCIÓN

Durante gran parte del siglo XX el uso de modelos en la ciencia no es adecuadamente valorado por los filósofos, exceptuando por ejemplo a Hesse (1953; 1966) y se le presta toda la atención a los conceptos de leyes y teorías científicas (Koperski, 2006, p. 2)¹. A partir de los trabajos de Hesse (1953) y Black (1962) otros autores² empiezan a interesarse por el tema de los modelos, convirtiéndose en la actualidad en una temática obligada para filósofos y científicos lo que ha generado numerosos artículos, libros y trabajos investigativos relacionados con el tema³; De Donato (2005) centra su trabajo específicamente en las idealizaciones y aproximaciones usadas en ciencia, discutiendo profundamente los distintos enfoques y propuestas correspondientes. Es tal la gama de modelos diferentes usados en todos los campos de la ciencia y las herramientas utilizadas para su construcción, que se ha vuelto una tarea complicada la definición del término modelo⁴ y más aún encontrar una clasificación coherente para estos. En lo que sí se ha logrado un consenso entre filósofos y científicos es en el hecho de que los modelos tratan de simplificar el sistema que representan, que a nivel general son inexactos, manipulables, mejorables y que por lo tanto contienen idealizaciones y aproximaciones conocidas y a veces controlables por parte del investigador.

La denominación básica de este trabajo: *Idealizaciones y aproximaciones en la formulación de modelos: una justificación pragmática*, dilucida la temática principal de la investigación y su propósito fundamental. Aunque son bastante interesantes las teorías matemáticas sobre idealizaciones y aproximaciones de Nowak (1992; 1994), Kupracz (1994) y en general de la escuela de Poznan, no se abordan en este trabajo, y más bien las abstracciones usadas en la construcción de modelos se tratan de justificar a nivel teórico o a nivel práctico cuando fijamos los límites de aplicación de estos y en general de las leyes científicas. Para el propósito de esta propuesta pesa más nuestra confianza en la ciencia que la justificación de las idealizaciones a través de una teoría matemática de estas:

¹ En los albores del siglo XX los modelos se consideraban poco significativos en el contexto científico (hipotéticos y dispositivos heurísticos) y en la filosofía de la ciencia se concebían las leyes y teorías como portadores de conocimiento acerca del mundo real. Duhem (1914, p. 125) apoyándose en los desarrollos de Kelvin y Maxwell, sostiene que los modelos mecánicos no tienen un papel significativo en la construcción de sus teorías. Decir que los modelos no eran tema de discusión entre filósofos a principios del siglo XX no significa que estos no fueran ampliamente usados desde la antigüedad. Rivadulla (2007) muestra cómo los astrónomos griegos usaban modelos geométricos del universo, los cuales usaron posteriormente ya reformulados Tycho Brahe, Kepler y Copérnico. Max Weber (1904) fue de los primeros filósofos en señalar la importancia de las idealizaciones en ciencia y las define como una construcción mental que tiene el carácter de una utopía en sí, que es obtenida a partir de la exageración mental de determinados elementos de la realidad (De Donato, 2007, p. 154).

² Koperski (2006, p. 2) cita a Hesse (1966), Bunge (1973), Redhead (1980), Cartwright (1983) y Wimsatt (1987) entre otros.

³ Anteriores a este trabajo se realizaron varias propuestas investigativas que se ocupan del tema de los modelos y las leyes usadas en ciencia, entre las cuales se pueden referenciar: Suciú (2005) que trata la clasificación histórica y conceptual de las leyes, necesidad nómica y contrafácticos, el problema de las leyes *ceteris paribus* y el rol de las leyes en la explicación científica. El trabajo de Calvo (2006) que es muy compatible con las posturas pragmáticas de los modelos científicos y la investigación de Santana (2006) que hace un análisis muy profundo y actualizado sobre la relación entre leyes y explicación científica. Guerrero (2003) realizó su proyecto acerca de la concepción semántica de las teorías, confrontando el estructuralismo y el enfoque como espacio de estados. Díaz (2007) presenta una investigación importante para la enseñanza de la estadística bayesiana.

⁴ «El término *latino modulus* designaba en el origen la medida arbitraria que servía para establecer las relaciones de proporción entre las partes de una obra de arquitectura. En la Edad Media este *modulus* se convierte en el *moule* Francés, *mould* en Inglés, *model* en Alemán, *módulo* en Español. En el Renacimiento el italiano, *modello* da lugar al Francés *modèle*, al Inglés *model*, al Alemán *modely* y al Español *modelo*» (Armatte, 2006, p. 34).

Aunque la verdad científica no es incontrovertible, proporciona una base razonablemente fiable para la acción humana: no tenemos absoluta certeza de que el próximo cuerpo que dejemos libre caiga; pero no acostumbramos bailar en los bordes de las ventanas. Aunque no sabemos con certeza que es la gravedad, confiamos en la física para ir y volver de la luna (Hecht, 1999, p. 10).

Aunque en este trabajo se trata de justificar a nivel pragmático el uso de idealizaciones y aproximaciones en la formulación de modelos, se considera en todo momento el aparato conceptual que sustenta su uso, sin alinearse en un empirismo extremo de que si las cosas funcionan son fiables o infalibles: «James Watt optimizó la máquina de vapor partiendo de la base de la comprensión del calor, basada en el flujo de un fluido invisible que en realidad nunca existió. La teoría era falsa pero el motor era correcto» (Hecht, 1999, p. 9)⁵. Se justifican las idealizaciones y aproximaciones a nivel pragmático, en el sentido de que se consideran los modelos como útiles o inútiles, adecuados o no adecuados; pero no se discute acerca de su semejanza o correspondencia con la realidad. Además, siempre se trata de usar ejemplos reales o del contexto científico en contraposición con algunos filósofos que apelan a contra-ejemplos pseudocientíficos o experimentos mentales (ver Reiss, 2005, p. 38)⁶. Se propondría incluso desestimar todo análisis filosófico de explicación científica, causalidad o noción de ley que se sustente en eventos hipotéticos imaginarios o lejanos a la realidad cotidiana y científica.

Este trabajo está dividido en cuatro partes, las cuales tienen que ver de una u otra forma con los conceptos de idealización, aproximación, modelos y leyes en la ciencia⁷. El estudio de los modelos no se puede desligar de las leyes y teorías científicas porque están tan íntimamente relacionados, que incluso en ocasiones nos referimos indiscriminadamente a estos: se habla de ecuación de Schrödinger y no de ley; y los libros de mecánica cuántica no hablan siempre de ley de Schrödinger, aunque esta juega en

⁵ Esta es una cita tomada del texto referenciado. En este trabajo no se discute si las teorías son verdaderas o falsas sino que se trata de justificar las idealizaciones a nivel práctico. Además no es muy claro decir que un motor es correcto; más bien, funciona correctamente.

⁶ Hay filósofos como Salmon (1984) que tratan de formular su teoría de la causalidad contextualizada al campo empírico y más concretamente de la ciencia. Dowe (2004) tiene una postura semejante a la de Salmon y dice que los ejemplos que usa Schaffer (2004) para defender la no conexión entre causa y efecto no corresponden a procesos sino a pseudo-procesos.

⁷ Díez y Moulines (1999, p.135) proponen considerar equivalentes las idealizaciones con las cláusulas *ceteris paribus* que es un eje temático básico del capítulo tres de este trabajo. El enfoque de este trabajo es compatible con estos autores porque no es muy nítida la diferencia entre leyes idealizadas y leyes *ceteris paribus*, aunque se tratará de dilucidar y diferenciar estos dos conceptos. Considerando que los modelos deterministas (matemática y geometría) arrojan resultados cien por ciento exactos o «verdaderos», los modelos probabilistas podrían considerarse como aproximaciones confiables en la representación de un fenómeno. Mancosu (2008) menciona cómo Shapiro relaciona las idealizaciones con el rol explicativo de las matemáticas abordado en el capítulo tres:

We thus see that the problem of the explanatory role of mathematics in science is intimately related to problems of modeling and idealization in science. In turn, understanding how modeling and idealization work is an integral part of addressing the question of how mathematics hooks on to reality, i.e. an account of the applicability of mathematics to reality (Shapiro, 2000, p.35).

La siguiente cita muestra cómo en el bayesianismo, abordado en el capítulo cuatro, se pueden encontrar relaciones con las idealizaciones:

Even if the assumption of logical omniscience is not too much of an idealization to provide a useful model for human reasoning, it has another potentially troubling consequence. It commits Bayesian epistemology to some sort of a priori/a posteriori distinction, because there could be no Bayesian account of how empirical evidence might make it rational to adopt a theory with a non-classical logic. In this respect, Bayesian epistemology carries over the presumption from traditional epistemology that the laws of logic are immune to revision on the basis of empirical evidence (Talbot, 2008, p.11).



mecánica cuántica un rol semejante a las leyes de Newton en la física mecánica y por lo tanto deben ser vistas como leyes. En contraste, hay otras cosas denominadas leyes que en realidad son verdades matemáticas: *The Hardy-Weinberg law in population genetics* (Roberts, 2004, p. 155). De la misma forma, los conceptos de idealización y *ceteris paribus* no se pueden abordar ignorando el concepto de abstracción, que como lo sostienen algunos autores⁸ los arroja a ambos, no siendo muy nítida su diferencia.

Aunque este trabajo investigativo está enmarcado dentro la filosofía de la ciencia a nivel global, aborda una gama amplia de problemáticas y modelos de diversas disciplinas como la física, la matemática, la economía y la estadística⁹; lo cual hace el trabajo compatible con las diversas ramificaciones que ha experimentado la filosofía de la ciencia en los últimos años y que se han enfocado a disciplinas más específicas¹⁰: filosofía de la matemática, filosofía de la economía y filosofía computacional, entre otras. Sin embargo, así el tema de los modelos y las idealizaciones sean afines a todas estas áreas del conocimiento, se mostrará, y es una de las tesis que se va a defender, cómo su concepción y manejo presenta divergencias significativas de una disciplina a otra: por ejemplo, mientras el físico puede ejercer más fácil control sobre las abstracciones (variables consideradas y omitidas) en la construcción de un modelo, esto es una tarea más complicada si no imposible en el caso del economista que maneja un mayor número de variables involucradas en un fenómeno. También se va a sustentar que es más sencillo elaborar modelos económicos que usan supuestos de maximización y minimización de variables, que los modelos físicos en su mayoría deducidos a partir de leyes y teorías fundamentales¹¹. Otro cuestionamiento importante y que hace parte de los objetivos centrales de este trabajo es dilucidar el rol de las leyes científicas y los modelos en física en contraste con las ciencias sociales; hay autores (Roberts, 2004) que no creen en la existencia de genuinas leyes sociales, mientras otros como Kincaid (2004) defienden su uso en las ciencias especiales. Ya Weber (1904) proponía que el científico social no

⁸ Rappaport (1998) señala que la abstracción es un proceso en el cual se representa la realidad omitiendo unos factores y considerando otros (proceso de omisión e inclusión selectiva): las descripciones verbales, los mapas y los diagramas son todas formas de representación. Galileo describe la caída de los cuerpos omitiendo la fricción del aire pero incluyendo la aceleración. En un mapa se omiten calles pequeñas y se incluyen las grandes (*Ibid.*, p. 102). El autor distingue dos tipos de abstracción: una es una representación parcial y la otra una idealización. El mapa de una ciudad es una representación parcial. En cuanto a las idealizaciones se puede hablar de asunción idealista y de hipótesis ideal. Son asunciones idealistas: «la resistencia del aire no tiene efecto en la caída de los cuerpos, la resistencia del aire no existe». Todos los cuerpos caen con una aceleración constante es una hipótesis ideal. Aquí se puede notar ya una diferencia entre la representación parcial y la idealización: un mapa de Londres omite pequeñas calles pero no estipula su no existencia (*Ibid.*, p. 104). Posteriormente se vuelven a retomar los conceptos de abstracción e idealización en relación con las leyes CP.

⁹ En este trabajo es muy generalizado el uso de axiomas de la estadística y distribuciones de probabilidad que alguien podría objetar de que sean modelos en todo el sentido de la palabra. Así como en la física se tuvo que aceptar la existencia de genuinas leyes estadísticas, aquí se habla de modelos probabilísticos refiriéndose a las distribuciones de probabilidad (binomial, poisson, normal) porque se encuentran en estas las características básicas de un modelo: representan fenómenos concretos, tienen poder predictivo y a veces explicativo, sirven como elemento de juicio para tomar una decisión y son por naturaleza inexactos y aproximados. Dentro de las características que reúne un modelo Coleman (2002, p. 7) menciona: los modelos se refieren a la realidad, son representaciones simplificadas de esta y son más simples que los procesos o fenómenos que ellos estudian o modelan. Además, en los modelos se incluyen los factores más importantes y los menos importantes son inicialmente ignorados. Por ejemplo, en el modelo binomial se afirman cosas como que la probabilidad de éxito de 0.3 permanece constante de un ensayo a otro. Ese valor de 0.3 no es un valor exacto o determinista sino que se toma de estudios anteriores: por ejemplo que de cada cien estudiantes que ingresan a una universidad solo treinta se gradúan o que de cada diez personas que se someten a una cirugía de corazón tres de ellas mueren.

¹⁰ Torretti (1999), Thagard (2005), Horsten (2007), Hausman (2008), Rosenberg y Arp (2009).

¹¹ La tercera ley de Kepler como modelo que relaciona el diámetro y el periodo de las órbitas de los planetas en su movimiento de traslación, primero fue obtenida por tanteo y posteriormente se dedujo a partir de la mecánica newtoniana. Algo similar ocurre con el modelo del péndulo simple que se puede obtener a partir de las leyes de Newton o mediante otras técnicas abordadas en este trabajo.

debería imitar al de las ciencias naturales y que el objetivo del científico social no es el de establecer leyes generales sino dar explicación de eventos particulares. Otro aspecto controvertido objeto de esta investigación está relacionado con el análisis del carácter explicativo de los modelos científicos, que es defendido por algunos autores (Quine, 1976; Putnam, 1979) y cuestionado por otros (Fahmi, 2008)¹².

Estos objetivos específicos del trabajo están inmersos en un objetivo más amplio: comprender el carácter ideal, aproximado y en general inexacto de los modelos usados en ciencia, de tal forma que nos permita considerarlos como un elemento de juicio que lleva implícitas las restricciones y limitaciones correspondientes¹³.

Esta propuesta acerca de los modelos la autodenomino «enfoque falsacional», porque la encuentro compatible con la percepción de Popper (1959) acerca de las teorías científicas: hay que buscar en las teorías no la verificación sino la crítica o falsación, lo que permite progreso en la ciencia cuando emergen nuevos paradigmas. Se propone, relacionado con los modelos científicos, centrar nuestros esfuerzos investigativos más en las supuestas limitantes (idealizaciones) que en sus bondades, lo que conlleva a una mejor comprensión de los fenómenos, al refinamiento de las teorías y se generan grandes posibilidades investigativas al introducir nuevas variables al modelo. En contraste con Kuhn (1962), Popper (1983) considera que una revolución científica no invalida completamente la teoría anterior; es el caso de la mecánica newtoniana que no es completamente derrumbada por la teoría relativista y sigue siendo aproximadamente válida para velocidades pequeñas. En forma análoga, cuando construimos un modelo, este nos hace pensar en sus propias mejoras con un modelo más certero, pero el modelo anterior sigue siendo útil para ciertas condiciones. Esto se verá posteriormente con los modelos del *C-14* para datar fósiles, la ecuación de estado para gases ideales y el modelo CEP de inventarios. Aunque se han mejorado ostensiblemente estos tres modelos siguen siendo adecuados para condiciones muy específicas.

En contraste con otros autores que miran las idealizaciones como una limitante de las leyes y modelos (Samuelson, 1963; Roberts, 2004), en este trabajo se conciben como una alternativa; una posibilidad para profundizar en el estudio de un fenómeno y aprender del modelo en el proceso de omitir e incluir nuevas variables¹⁴. A lo largo de todo el trabajo se defiende la tesis de que el modelo como abstracción es lo que nos permite explicar algunos fenómenos y representar aproximadamente los rasgos del sistema real asociado. Si el modelo fuera un reflejo fiel de la realidad sería tan inútil como un mapa en escala uno a uno de una ciudad y tan difícil de manipular como la realidad misma. Se propone

¹² Hay filósofos (Balaguer, 2008) que solo atribuyen a los modelos una función descriptiva reservando el carácter explicativo solo para las leyes y teorías científicas. En este trabajo se va a sustentar con ejemplos concretos y reales cómo hay determinados modelos (no todos) no solo de la física, sino también de la matemática y otras disciplinas, que pueden servir para explicar un fenómeno específico. Sin embargo, se acepta que el poder explicativo de los modelos a nivel general no es equiparable con el de las leyes y teorías.

¹³ Así como Giere (2008) habla de una concepción intencional de la representación y Suárez (2004) defiende una concepción inferencial, autodenominaría este enfoque, “una concepción falsacional de la representación”, porque se centra el trabajo más en las limitaciones (idealizaciones, aproximaciones) y restricciones de los modelos que en sus virtudes y bondades. De acuerdo a esta concepción el modelo es un elemento de juicio que guía al investigador, el cual decide dónde y cuándo usarlo en el estudio de un fenómeno. El hecho que los modelos sean simplificados e inexactos hace que los miremos como falibles y por lo tanto ostensibles de falsación. Sin embargo el hecho de que seamos conscientes de sus limitantes y ejerzamos control sobre estas, justifica su uso.

¹⁴ La ecuación de estado es un ejemplo muy ilustrativo de cómo se puede ir mejorando el modelo para optimizar su alcance, lo que nos ayuda a ganar en la comprensión de toda la teoría que subsume a este modelo.



mirar los modelos desde una perspectiva pragmática sin cuestionar si son reales o imaginarios, verdaderos o falsos y que es en cierta forma compatible con el enfoque de los instrumentalistas acerca de las teorías científicas: «Las teorías son útiles o inútiles, adecuadas o no adecuadas, pero no son verdaderas ni falsas». El objetivo de la mayoría de trabajos no consiste en tratar de representar exactamente la realidad sino en construir un modelo simplificado de la misma y por lo tanto *a priori* falso (Joreskog y Sorbom, 1986)¹⁵.

La primera parte de este trabajo, «Los modelos en el contexto científico», tiene la intencionalidad de proponer un nuevo enfoque acerca de tres aspectos básicos: la noción de modelo en la ciencia, clasificación de los modelos científicos y la relación modelo-ley-teoría. Respecto a la noción de modelo se encuentra que la mayoría de las definiciones afirman que un modelo es una representación¹⁶ de algo, lo cual es obvio porque todo modelo es una representación, pero no toda representación es un modelo. Se defiende la tesis de que la definición de modelo debe responder a tres preguntas básicas: ¿Qué es un modelo?, ¿cuál es su función? y ¿qué limitantes tiene? Antes de proponer en este trabajo otra definición¹⁷ se aborda la noción de varios autores, se confrontan y se toma lo mejor de estas.

En cuanto a la diversidad de criterios usados para clasificar los modelos en ciencia, se propone que se centren en las verdaderas potencialidades de los modelos: la manipulabilidad, la posibilidad de interacción que le brindan al usuario y su intervención directa (mediada por el usuario) en el avance científico. Se desestima el énfasis en la representación en una postura netamente pragmática: los modelos más que representar intervienen activamente en el quehacer científico (Knuuttila, 2004; Hacking, 1998)¹⁸. Se propone una clasificación aparentemente simple pero acorde con este enfoque: modelos interactivos y pasivos. Los primeros son los que permiten una verdadera interacción con el usuario y brindan conocimiento de diversas maneras diferentes a la mera representación. Los modelos pasivos cumplen básicamente una función representacional y en este trabajo se identifican con muchas analogías usadas en ciencia, de las cuales no se desconoce su gran valor desde el punto de vista didáctico.

La relación entre modelos, leyes y teorías, sus afinidades y divergencias, es una temática todavía muy discutida en la filosofía de la ciencia. Esto debido a que muchos autores (concepción semántica) consideran los modelos embebidos en las grandes teorías y otros (Cartwright, 1999a; Morrison y

¹⁵ Joreskog y Sorbom desarrollaron varias versiones del programa LISREL, usado en la modelación con sistemas de ecuaciones estructurales (SEM).

¹⁶ Boltzmann (1902) en la décima edición de la enciclopedia británica define modelo como una representación tangible de un objeto que tiene una existencia real o que es una construcción factual o mental (Armatte, 2006, p.35). *The Oxford English Dictionary online* provee tres significados de la palabra modelo: modelo como estructura de representación, modelo como un tipo de designación y modelo como objeto de imitación (Coleman, 2002, p. 6). Para Giere (1988) un modelo es un objeto abstracto, idealizado, el cual puede ser usado para representar un sistema empírico (en Odenbaugh, 2008, p. 13).

¹⁷ Se considera como condición inicial que toda definición debe ser corta y exenta de anotaciones explicativas o argumentativas relacionada con los términos que utiliza. Aun así debe dilucidar significativamente las características del término a definir. Concibo el modelo como una abstracción que permite realizar inferencias acerca de un sistema real, el cual generalmente contiene aproximaciones y asunciones idealistas manipuladas intencionalmente por el investigador. Esta simple definición dice qué es un modelo (una abstracción), cuál es su función (inferir más que representar), restricciones del modelo (aproximaciones e idealizaciones) y la interacción que permite con el usuario.

¹⁸ Esta discusión se abordará en los capítulos uno y dos de este trabajo, donde se defiende la posición de Ibarra y Mormann (2000; 2006), Larrañaga (2009) de que no se pueden desligar las funciones representacional e interventiva de los modelos: los modelos representan e intervienen.

Morgan, 1999)¹⁹ conciben los modelos como mediadores entre la teoría y el mundo real. Cartwright *et al* (1995b) sugiere que los modelos, no las teorías científicas, son los portadores de conocimiento empírico. Esta percepción plantea un gran interrogante por dilucidar: ¿Son los modelos o las teorías las que describen el mundo empírico? Para agregar a los diversos criterios que se han propuesto en la diferenciación entre modelos y teorías, se defiende la tesis de que la manipulabilidad y mejorabilidad de los modelos es una característica que los diferencia de las teorías, que requieren de periodos considerables de tiempo para ser cuestionadas²⁰.

Por último, se cierra esta primera parte del trabajo haciendo una defensa teórica y pragmática de las idealizaciones y aproximaciones usadas en la ciencia²¹. Se defiende la tesis de que la obtención de modelos por simulación en el ordenador puede ser un proceso desorientador para el investigador, dado que estos software conllevan las idealizaciones (cero fricción) difíciles de alcanzar en la modelación real. El investigador debe estar capacitado para controlar dichas idealizaciones y mostrar que el error generado por estas, es poco significativo a nivel empírico.

Las aproximaciones usadas en ciencia han sido de tipo formal, como por ejemplo asumir que el seno de un ángulo es igual a este para ángulos pequeños. Frigg y Hartmann (2006) mencionan otra aproximación muy utilizada en los modelos de regresión: ajustar una recta o una curva a una serie de puntos que muestran esta tendencia pero que realmente no están todos sobre dicha curva. El aporte fundamental de esta investigación en este aspecto tiene que ver con la posibilidad de usar un modelo como aproximación de otro, lo cual ha sido muy poco trabajado en la filosofía de la ciencia²². Esto a su vez sirve como argumento en contra del isomorfismo²³ que se abordará posteriormente: porque se muestra cómo dos modelos diferentes pueden representar un mismo fenómeno, lo cual no es compatible con dicho criterio.

La segunda parte del trabajo, «El papel multifuncional de los modelos en la ciencia», tiene como objetivo fundamental proponer un enfoque más amplio e integral²⁴ acerca de los modelos científicos no

¹⁹ Odenbaugh (2008, p.19) referencia lo expresado por Morrison y Morgan: “Although we want to argue for some general claims about Models-their autonomy and role as mediating instruments, we do not see ourselves as providing a theory of Models. The latter would provide well-defined criteria for identifying something as model and differentiating models from theories” (Morrison y Morgan, 1999, p. 12).

²⁰ No quiere decir que las teorías no sean mejorables ni manipulables sino que requieren de extensos periodos de tiempo (siglos) para sufrir transformaciones sustanciales, lo que no ocurre con los modelos usados en ciencia que pueden experimentar mejoras en periodos más cortos de tiempo.

²¹ En esta defensa lo primero que se trata de dejar claro es que el hecho de que los modelos contengan idealizaciones y aproximaciones no es fundamento para estigmatizarlos de irreales, imaginarios o falsos. El modelo como representación puede que sea imaginario pero nunca desligado de la realidad científica. Como lo señala Baird (1991), cuando se le coloca la baldosa a una habitación rectangular se usa el área de un rectángulo que es imaginario, pero se contextualiza en el piso que es algo real. También se muestra con ejemplos concretos cómo el error introducido por las idealizaciones y aproximaciones es poco significativo a nivel práctico, lo cual justifica su uso.

²² Se muestra cómo se pueden utilizar los modelos de Poisson y normal como aproximación del modelo binomial, pero enfatizando en qué casos es fiable esta aproximación. También se muestra cómo hay una serie de modelos particulares que pueden ser subsumidos por un modelo más general y por lo tanto pueden usarse para estudiar un mismo fenómeno: para datar fósiles puedo usar la misma ecuación diferencial pero con elementos que tienen una tasa de desintegración diferente (C-14, Uranio-238), lo que hace a unos modelos más bondadosos que los otros. Los métodos del C-14 y del U-238 son una buena aproximación para datar fósiles en determinados rangos pero no en todos los casos.

²³ Para van Fraassen (1980) la relación entre modelo y sistema empírico consiste en isomorfismo. Para Giere (1988) la relación entre modelo y sistema empírico es la de similaridad.

²⁴ En un enfoque integral no se centra el debate específicamente en un aspecto relacionado con los modelos sino que se trata de abordar varios problemas: representación, interacción con el usuario, idealizaciones y construcción de modelos.



solo centrado en la representación²⁵ y donde no únicamente se indague qué son los modelos sino que se enfatice en su construcción y en la multiplicidad de funciones que pueden desempeñar en todos los campos de la ciencia²⁶. Relacionados con este objetivo se defienden y sustentan varias tesis: los modelos tienen características que los hacen diferenciables de las metáforas y analogías; son manipulables por parte del usuario, mejorables y construidos usando diversas técnicas. Los modelos que permiten esta interacción con el investigador son los que en este trabajo se han llamado interactivos y se deja abierta la posibilidad de considerar las analogías como modelos pasivos o representativos. Otra tesis que se defiende es que la modelación debe ser considerada como un doble proceso descubrimiento-construcción del modelo, donde la primera actividad (descubrimiento) es más complicada y valiosa que la segunda, la cual puede ser ejecutada incluso por el ordenador o por otra persona totalmente ajena al problema en cuestión²⁷. En resumen, en esta segunda parte del trabajo se adopta una posición muy compatible con Knuutila y Voutilainen (2002): «Viendo los modelos como artefactos epistémicos, proporcionan conocimiento de muchas formas distintas a la representación directa», pero se enfatiza en que no se pueden desligar el carácter representacional e interventivo de los modelos (Ibarra y Mormann, 2000; 2006). Esta es la denominada concepción pragmática de los modelos, compatible con el enfoque de Hacking (1998), Morrison y Morgan (1999) entre otros²⁸.

La tercera parte del trabajo, «Leyes y modelos en la explicación científica», trata de vislumbrar una relación constante e indisoluble entre estos tres elementos (ley-modelo-explicación), pero considerando que no todos los modelos de explicación se fundamentan en las leyes científicas y que hay un cuarto elemento de vital importancia en esta temática: la causalidad. La introducción del concepto de causalidad parece solucionar algunos problemas de los primeros modelos de explicación propuestos y sugiere una relación estrecha entre causalidad y explicación (Santana, 2006, p. 138). El objetivo central de este capítulo es, entonces, dilucidar el papel que cumplen los modelos y leyes en física en contraste con las ciencias sociales. Para alcanzar este objetivo, inicialmente, se aborda someramente el concepto de ley científica y las controversias más importantes al respecto: regularidades nómicas vs generalizaciones accidentales, regularistas y necesaristas, leyes *ceteris paribus* en física y en economía, ¿hay verdaderas leyes en las ciencias sociales? Posteriormente se abordan los modelos clásicos de

²⁵ Rivadulla (2007, p. 16), en una posición claramente extrema, señala: No tiene sentido decir –en un sentido realista del término representación–, que los modelos representan aspectos del mundo, pues el acceso al mundo está condicionado por el propio modelo, el cual no puede ser al tiempo juez y parte del proceso cognitivo.

²⁶ Se enfatiza en otras funciones de los modelos distintas a la simple representación y que tienen que ver con el carácter interventivo de estos: determinar variables físicas a partir de un modelo conocido y validado, formular un modelo más simple para representar un fenómeno, inspirados en un modelo más complejo que representa el mismo fenómeno y generar nuevos interrogantes al investigador en el proceso de modelado.

²⁷ Un especialista en estadística o un matemático puro pueden elaborar toda clase de modelos relacionados con infinidad de disciplinas y problemas, pero es el investigador de la disciplina específica quien decide cuales variables deben ser consideradas u omitidas en la formulación y construcción del modelo (contexto de descubrimiento).

²⁸ Es muy importante observar que en la concepción semántica de las teorías pueden derivarse distintas posturas, unas más alejadas que otras de la realidad científica, pero que coinciden en que las teorías no son conjunto de enunciados sino conjunto de modelos. Odenbaugh (2008) analiza las diferencias entre estas vertientes: la más conservadora concepción semántica (van Fraassen, 1980) clama que la relación entre modelo y mundo es de isomorfismo; mientras que una concepción más liberal (Giere, 1988) considera que el isomorfismo no puede dar cuenta óptimamente de las idealizaciones usadas en los modelos y defiende una relación de similaridad modelo-mundo. El enfoque de Giere procura ser más cercano a la praxis científica que el enfoque de van Fraassen.

explicación científica, el rol de las leyes en estos y el papel de la causalidad en la explicación: ¿Están las causas físicamente conectadas a sus efectos?²⁹ (Hitchcock, 2004; Domazet, 2006).

Los dos temas con que se inicia el capítulo (leyes y explicación científica) han sido profundamente discutidos en filosofía de la ciencia³⁰ y en este trabajo se tiene muy poco para aportar al respecto, pero no se pueden pasar inadvertidos porque nos permiten abordar con mayor claridad un tema de mayor actualidad y que tiene relación con estos: explicación en matemática y matemática en la explicación. Se trata de argumentar básicamente que, así como hay explicaciones físicas de fenómenos físicos, hay la posibilidad de usar explicaciones matemáticas de cuestiones matemáticas y lo que es más complicado, explicar fenómenos empíricos usando modelos matemáticos. Es decir, que en contraposición con algunos filósofos que solo confieren poder explicativo a las leyes y teorías científicas (Balaguer, 2008), se defiende la función explicativa y no solo descriptiva de ciertos modelos³¹. Es muy importante puntualizar que no se trata estrictamente de un debate realismo-instrumentalismo, porque no se debe confundir los términos verdad y explicación (Cartwright, 1983), dado que se podría resultar realistas respecto a ciertos cuestionamientos (existencia de átomos, quarks y genes) y anti-realistas respecto a la necesaria existencia de ciertas entidades matemáticas (números, funciones). Cartwright (1983) señala que hay leyes que contienen cláusulas *ceteris paribus* y por lo tanto son literalmente falsas, pero que tienen la capacidad de explicar fenómenos.

Para cerrar este tercer capítulo, se tratan brevemente tres temáticas muy controvertidas sobre las cuales no se ha dicho la última palabra y por lo tanto siguen siendo objeto de intensos debates: Las cláusulas *ceteris paribus* como estrategia de elucidación, no de protección (Mäki, 2003), la conexión entre causas-efectos (Dowe, 2004) y la posibilidad de utilizar software para descubrir relaciones causales (Spirtes, Glymour y Scheines, 2000). Al respecto se defienden básicamente las siguientes tesis: en primer lugar, se argumenta que los científicos de las ciencias naturales -no se da como un hecho en las ciencias sociales- usan las cláusulas *CP* no como estrategia de defensa contra la falsación (Popper) sino para fijar los límites de aplicabilidad de las leyes y modelos. En segundo lugar, se defiende la tesis de que no existe una teoría universal acerca de la causalidad³² y que estas se cumplen solo considerando el contexto o en un dominio restringido. Por ejemplo, es muy complicado defender la existencia de una relación física entre causa y efecto a menos que se trate de contextualizar la teoría al campo empírico y específicamente de la física, como lo hace Salmon (1984). De lo contrario siempre se encontrarán contraejemplos que falsan dicha teoría en el mundo cotidiano o en situaciones hipotéticas no reales. Se defiende la tesis de que si nos restringimos a la física siempre hay una relación entre causa efecto y es el objetivo de la ciencia encontrar dicha relación.

²⁹ Schaffer (2004) argumenta que las causas no están físicamente conectadas a sus efectos, lo cual es refutado por Dowe (2004) quien sustenta que sí hay una conexión entre causa y efecto. Reiss (2005, p.41) muestra un ejemplo a favor de la postura de Schaffer pero no contextualizado al campo empírico.

³⁰ Se recomienda el libro de Díez y Moulines (1999) para dilucidar el concepto de ley científica y los distintos cuestionamientos asociados a este término. Santana (2006) realiza un excelente análisis cronológico de los más controvertidos modelos de explicación científica, considerando el enfoque al respecto de Cartwright (1983), referencia obligada en muchos de los debates abordados en este trabajo.

³¹ Para defender la función explicativa de ciertos modelos se abordan problemas que a pesar de no ser científicos son reales o de la vida cotidiana, lo cual justifica que sean considerados y valorados. También se utilizan modelos relacionados directamente con la matemática, la física y la estadística. Cartier, Rudolph y Stewart (2001) analizan como una entre las tantas funciones de los modelos, la posibilidad de explicar fenómenos del mundo real.

³² Se abordan las cuatro teorías clásicas sobre causalidad (regularista, probabilista, contrafáctica y cantidades conservadas) mostrando ejemplos que las desestabilizan cuando no se tienen en cuenta factores contextuales.



La otra tesis que se defiende tiene que ver con los modelos causales cuyas relaciones intrínsecas entre sus variables asociadas se considera son postuladas por el investigador conocedor del fenómeno en estudio y no por el ordenador o cualquier otra herramienta utilizada³³. Si un algoritmo tuviera la virtud de revelar todas las relaciones de causalidad presentes en un fenómeno, ciencias como la medicina por ejemplo ya habrían detectado el origen y posible tratamiento de todas las enfermedades. Esto es más complicado aún en las ciencias sociales donde convergen multiplicidad de factores en la causa de un mismo efecto y que no muestran cierta regularidad para plasmarlas en un modelo lineal o curvilíneo inclusive.

En la última parte de la investigación se hace una defensa de la inferencia inductiva y se trata de mostrar cómo es posible aprender inductivamente de la experiencia, contrario al enfoque de filósofos modernos como Rivadulla (1991) y de otros clásicos como Popper (1959) que cuestiona drásticamente la metodología inductiva³⁴. Para defender esta tesis se utilizan modelos probabilísticos y se muestra cómo la estadística frecuentista tiene un doble carácter inductivo/deductivo: es inductiva en su aplicación (va de la muestra a la población) pero deductiva en su axiomatización (de la población a la muestra). Por ejemplo, el teorema del límite central, cimiento de la estadística inferencial, se obtiene deductivamente pero en la práctica se aplica inductivamente. Además se muestra cómo no sólo este grandioso modelo se puede obtener por inducción sino otros modelos probabilísticos como el binomial o el hipergeométrico.

Se finaliza esta última parte del trabajo confrontando la estadística clásica con la bayesiana, la cual no solo brinda argumentos a favor de la tesis planteada en un principio, es posible aprender de la experiencia sino que vislumbra un cambio paradigmático en la concepción y utilización de las técnicas estadísticas y que es el interrogante más importante que queda abierto al finalizar esta investigación: ¿Cuál metodología es más adecuada en el trabajo científico, la frecuentista o la bayesiana? Es cierto que se han develado muchas falencias y limitaciones de la estadística clásica³⁵, pero entre tanto no se demuestre que hay otra herramienta mejor se debe seguir utilizando con los peligros asociados a esta: «Mientras el naufrago no encuentre algo más apropiado que una tabla para subsistir debe seguir aferrado de esta» (Silva y Muñoz, 2000).

En resumen, lo que nos proponemos en esta investigación es comprender el carácter ideal, aproximado e inexacto de los modelos científicos; lo que conlleva a considerar a estos como un elemento de juicio que nos permite decidir bajo qué condiciones y restricciones se pueden usar a nivel pragmático. Es decir, que no se deben mirar las idealizaciones como una limitante del modelo ni se

³³ En ningún momento se cuestionan las bondades de las redes bayesianas, los diagramas *path* o las ecuaciones estructurales e incluso considero que hay modelos tan complejos que sería imposible construir sin hacer uso de estas herramientas. Pero esto no quiere decir que el investigador haya perdido su papel protagónico en el contexto de descubrimiento de relaciones de causalidad entre las variables involucradas en un fenómeno, ni que al menos se vislumbre la posibilidad de perderlo en un futuro cercano.

³⁴ Popper es un gran crítico de la metodología inductiva en el contexto de justificación, pero no se compromete afirmando que no se puede aprender de la experiencia. El problema de la inducción no tiene que ver con la creación de hipótesis sino con su justificación (Díez y Moulines, 1999, p. 395). En este capítulo se trata de justificar el uso y validez de la inducción, no como un esquema válido universalmente sino en un contexto local donde el investigador es buen conocedor del fenómeno en estudio. Esta propuesta es compatible con la teoría material de la inducción (Norton, 2003b; 2009).

³⁵ La estadística clásica es manipulable como se verá posteriormente, lo cual puede ser usado por los gobernantes con fines no muy sanos. Otra crítica tiene que ver con que en la estadística frecuentista el estadístico puro estudia un fenómeno del cual muchas veces no tiene un óptimo manejo, lo que no es tan acentuado en el bayesianismo.

debe desechar el modelo por su carácter idealizado. Más bien, se deben especificar claramente las condiciones en las cuales es útil el modelo en el contexto de la ciencia. Se defiende que las idealizaciones y aproximaciones usadas en la construcción de modelos, más que una justificación matemática o teórica, son justificadas desde una perspectiva pragmática al corroborar que los resultados obtenidos son muy aproximados a los esperados si no introdujéramos dichas idealizaciones.

1. LOS MODELOS EN EL CONTEXTO CIENTÍFICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Frigg y Hartmann (2006, p. 1) mencionan una gran variedad de modelos y argumentan que corresponden a problemas distintos: en la semántica se pregunta por la función representacional, la ontología qué tipo de cosas son los modelos, para el epistemólogo interesa cómo aprendemos de los modelos y la filosofía de la ciencia indaga por la relación entre los modelos y las teorías científicas.

Antes de abordar una discusión más profunda y concreta de temáticas relacionadas con los modelos científicos tales como los modelos causales³⁶ o el empleo de cláusulas *ceteris paribus*³⁷ en la formulación de modelos, es importante y pertinente dilucidar en este primer capítulo estos cuestionamientos tan controvertidos en la extensa literatura que se ocupa del tema de los modelos en la ciencia: ¿Qué es un modelo: una abstracción o un objeto material?, ¿de acuerdo con qué criterio se clasifican los modelos: de acuerdo con su naturaleza o con su función en la ciencia?, ¿cómo se relacionan los modelos y las teorías científicas: son los modelos autónomos o dependientes de las teorías? Al final del capítulo se aborda el tema de las idealizaciones³⁸ y aproximaciones usadas en la construcción de modelos y se cuantifica en un experimento real el error asociado a las distintas idealizaciones utilizadas en este.

A medida que se trata cada temática y el enfoque de distintos filósofos y científicos, el autor fija su posición personal y aporta nuevos puntos de vista para la controversia enfatizando en las discusiones ya cerradas, las que se encuentran en auge y las ostensibles de abrir. Por ejemplo, hay un gran consenso respecto al hecho de que los modelos se construyen y no se descubren o que en general los modelos contienen idealizaciones y aproximaciones. En cambio, hay otras discusiones que aún siguen abiertas, como proponer un criterio claro para diferenciar los modelos de las leyes y teorías científicas o la misma definición y clasificación de los modelos usados en ciencia.

El objetivo central de este capítulo es entonces profundizar en el estudio de los modelos usados en ciencia y confrontar distintas concepciones acerca de estos, sus afinidades y diferencias con las leyes y teorías científicas. Para los distintos sub-temas tratados a lo largo del capítulo se pretende alcanzar los siguientes objetivos específicos:

³⁶ No todos los modelos explicitan una relación causa-efecto entre dos o más variables, pero los modelos causales que se tratarán en el capítulo tres son de vital importancia en el avance científico y específicamente en la economía, la medicina y la biología.

³⁷ El término *ceteris paribus* tiene distintas connotaciones y se tratará profundamente en el capítulo tres. Estas cláusulas se usan básicamente al considerar que algunas variables permanecen constantes en el estudio de un fenómeno específico. Esto simplifica el manejo matemático del modelo a costas de perder exactitud.

³⁸ Planos sin fricción, masas como puntos, resorte sin masa, campo gravitatorio uniforme, fuerza restauradora lineal, demanda constante, mercado en equilibrio perfecto son ejemplos típicos de idealizaciones (abstracciones) usadas en la construcción de modelos. El término idealización requiere de elucidación para diferenciarlo de las cláusulas *ceteris paribus*.

1. Dilucidar el concepto de modelo científico y proponer una definición que conteste varios cuestionamientos básicos: ¿Qué es un modelo, cuál es su función y que limitantes tiene?
2. Proponer una clasificación para los modelos que haga justicia a sus verdaderas potencialidades y no solo a su naturaleza o a su función representacional.
3. Proponer criterios que permitan diferenciar los modelos de las leyes y teorías científicas.
4. Cuantificar a través de un problema concreto la contribución al error total de cada idealización o abstracción usada en la formulación de un modelo, para mostrar que la diferencia entre los resultados esperados y los obtenidos es poco significativa a nivel práctico.
5. Evidenciar los errores potenciales que puede cometer un investigador al simular un experimento con la ayuda del ordenador, donde no se consideran las idealizaciones propias de toda modelación real.

Para los distintos cuestionamientos que se van a tratar de dilucidar en este capítulo y para los demás temas abordados, se van a defender unas tesis muy concretas que se esbozan a continuación:

1.1.1 ¿Qué es un modelo?

Tesis: la definición del término modelo debe responder a tres preguntas básicas: qué es un modelo (abstracción, simplificación, ecuación, objeto material...), cuál es su función (representar, explicar, predecir, describir, resumir, sintetizar, inferir, simular....) y qué limitantes tiene (idealizaciones, aproximaciones, cláusulas *CP...*).

1.1.2 ¿Los modelos se deben clasificar de acuerdo con su estructura, con su naturaleza o con la función que cumplen?

Tesis: dado que hay modelos que tienen un gran valor epistémico e inferencial, como los modelos a escala, pero otros cumplen una función simplemente representacional y solo tienen un valor didáctico, como los modelos de bolas y palos usados en química o el modelo atómico como un sistema planetario, se debe proponer una clasificación de los modelos que resalte este hecho y permita diferenciar los modelos de lo que son simples analogías o metáforas.

1.1.3 ¿Cómo se relacionan los modelos y las teorías científicas: cuáles son sus afinidades y diferencias?

Tesis: una de las características de los modelos científicos es que son manipulables, aproximados y mejorables. En cambio las teorías científicas requieren de cambios paradigmáticos³⁹ y en ocasiones de

³⁹ La física galileana rompió drásticamente con los postulados básicos del pensamiento aristotélico, como por ejemplo pensar que un cuerpo pesado cae más rápido que otro más liviano y sobre todo cambió por completo nuestra concepción sobre el universo en el que se tenía a la tierra como centro.

2. EL PAPEL MULTIFUNCIONAL DE LOS MODELOS EN LA CIENCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

Como ya lo han señalado algunos autores¹²⁴, el énfasis solo en la representación no se corresponde con el papel multifuncional que desempeñan los modelos en la ciencia. Estos intervienen activamente en el edificio científico, por ejemplo para determinar variables físicas a partir de un modelo conocido, construir nuevos modelos basados en otros ya utilizados y generar interrogantes al investigador en el proceso mismo de modelación. Los modelos deben concebirse como artefactos epistémicos y no pueden entenderse aislados de la actividad humana (Knuuttila y Voutilainen, 2002, p. 2). Complementan estos autores que, viendo los modelos como artefactos epistémicos, proporcionan conocimiento de muchas formas distintas a la representación directa.

El objetivo central de este capítulo es, entonces, proponer una visión integral y dinámica de los modelos, donde no solo se pregunte qué son los modelos sino que se enfatice en su construcción y en el papel multifuncional que cumplen en relación con las teorías científicas. Aunque es una temática de gran importancia en la filosofía de la ciencia, no se profundiza en las teorías representacionales¹²⁵.

En cada eje temático se pretende alcanzar unos objetivos específicos que se mencionan a continuación:

1. Dilucidar los conceptos de metáfora y analogía en relación con los modelos científicos, distinguiendo su uso en el ámbito cotidiano y en el campo de la ciencia.

Este tema no se aborda en forma extensa y profunda dado que de entrada no se encuentran en este trabajo razones de peso para confundir los modelos que son usados estrictamente en el campo científico con las analogías y metáforas que son muy usadas a nivel cotidiano y en menor escala en el contexto de la ciencia. Mientras el modelo cumple múltiples funciones que se resaltarán en este capítulo, se defiende que las metáforas y analogías solo tienen importancia desde el punto de vista didáctico¹²⁶.

2. Abordar distintas funciones y potencialidades que tienen los modelos científicos, distintas a la mera función representacional.

¹²⁴ Hay dos concepciones de los modelos: semántica y práctica. Knuuttila (2004) es una de las filósofas que más ha influenciado la concepción práctica a la cual me adhiero a lo largo de todo este trabajo. En este capítulo, se muestran varias funciones de los modelos complementarias a la representación y se enfatiza en el proceso de modelado abordando distintas herramientas y técnicas. Morrison y Morgan (1999) también enfatizan en otras funciones de los modelos distintos a la representación.

¹²⁵ Ibarra y Mormann (1997, 2005 y 2006). De acuerdo con Ibarra, deben estudiarse los distintos tipos de representaciones que usan los científicos en su trabajo. Las representaciones son básicamente relaciones entre agentes y porciones del mundo. No son un reflejo especular de la realidad ni pueden reducirse a un tipo de función matemática que preserva estructuras y relaciones (Olivé, 2004, p. 165).

¹²⁶ Sin embargo, hay autores que recalcan la gran importancia que pueden tener las analogías a nivel científico, lo cual en ningún momento se cuestiona. Lo que se reclama es que no se les puede equiparar con los modelos interactivos (en la clasificación que se ha propuesto) y que en el fondo están relacionadas con los modelos representativos de esta misma clasificación.

Para alcanzar este objetivo se mostrarán las virtudes que tienen los modelos y los múltiples propósitos para los que se pueden usar en ciencia e ingeniería: determinación de variables físicas a partir de un modelo ya construido y aceptado, construir nuevos modelos a partir de modelos ya conocidos y generar interrogantes al investigador en el proceso mismo de modelado, que permiten mejorar el modelo y la teoría en la cual se pueden contextualizar.

3. Reorientar la discusión acerca de lo que es un modelo hacia el proceso de modelado, las técnicas y herramientas usadas en la construcción de modelos, los alcances y limitantes en su uso a nivel práctico.

Para los diversos interrogantes que se plantean en este capítulo se defenderán las tesis que se mencionan a continuación:

2.1.1 ¿Son modelos las analogías y metáforas?

Tesis: hay rasgos de un modelo científico que implícitamente lo diferencian de las analogías¹²⁷ y metáforas¹²⁸. Los modelos son manipulables, mejorables, aproximados y construibles usando distintas técnicas¹²⁹. Las metáforas y analogías solo tienen un valor didáctico y si es necesario considerar algunos casos aislados de estas como modelos, se deben clasificar como modelos representativos o pasivos en la taxonomía que se ha propuesto en el capítulo anterior.

2.1.2 ¿Los modelos científicos representan, intervienen o realizan ambas funciones?

Tesis: los modelos interactivos, contrario a los modelos representativos¹³⁰, nos brindan conocimiento de diversas maneras convirtiendo en secundaria su función representacional, aunque se defiende en este capítulo que no se pueden desligar los conceptos de representación e intervención. Es decir, intervienen activamente en el desarrollo de la ciencia. Otra tesis que se va a defender es que ni el criterio de isomorfismo, ni el de similitud son suficientes para garantizar el poder representacional de un modelo.

¹²⁷ Toda analogía establece relaciones de semejanza entre dos o más cosas. Gentner y Jeziorski (1993) conciben la analogía como una correspondencia de conocimiento de un dominio a otro, tal que el sistema de relaciones que vale entre los objetos base también vale entre los objetos blancos. Black (1962) dentro de la clasificación que hace de los modelos menciona los modelos analógicos: es un objeto o proceso que reproduce en circunstancias distintas las relaciones presentes en el original. De acuerdo con esto, el modelo mecánico de Maxwell o Kelvin trata en cierto sentido de reproducir los fenómenos electromagnéticos (Rivadulla, 2006).

¹²⁸ Metáfora es transportar algo a un sentido figurado para comprenderlo. Del griego traslación, aplicación de una palabra o una expresión a un objeto o a un concepto al cual no denota literalmente, con el fin de sugerir una comparación (con otro objeto o concepto) y facilitar su comprensión. Por ejemplo, el átomo es un sistema solar en miniatura, el núcleo atómico es como una gota de líquido incompresible, las moléculas de un gas son como bolas de billar, el cerebro es un ordenador orgánico (Rivadulla, 2006, p. 190):

¹²⁹ Al final de este capítulo se muestran diversas técnicas para construir modelos pero no para descubrirlos, que es un proceso mucho más complejo. En el capítulo tres se abordarán los modelos causales y las distintas posturas que hay respecto a estos y si es posible o no usar programas de computador para descubrir relaciones causales.

¹³⁰ En el capítulo uno se propuso una clasificación de los modelos en interactivos y representativos. Mientras los primeros cumplen multiplicidad de funciones en la ciencia que se abordan en la sección 2.6, los modelos representativos solo tienen una función representacional aprovechada con fines didácticos básicamente.

3. LEYES Y MODELOS EN LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se advirtió en el capítulo uno de este trabajo, no es fácil demarcar claramente y con criterios universales u objetivos los conceptos de ley, modelo y teoría, aunque es aceptado que las leyes y teorías son de mayor alcance que los modelos y tienen un mayor poder explicativo y predictivo. No se tratará entonces en este capítulo de proponer dichos criterios, sino más bien el objetivo es dilucidar el rol que cumple cada uno de estos conceptos en el edificio científico y la forma en que se correlacionan en los procesos de explicación y predicción de fenómenos.

Hay gran consenso entre filósofos y científicos en cuanto al hecho de que una de las tareas y virtudes fundamentales de las leyes científicas es la de dar cuenta o explicar el porqué de ciertos fenómenos y/o de otras leyes. Por lo tanto se hace una conexión constante en este trabajo entre el concepto de ley y los distintos modelos de explicación científica propuestos a lo largo de la historia²⁰². El poder explicativo de los modelos en física no es comparable con el de las leyes y teorías, pero es viable su defensa para otras ciencias y en casos específicos o particulares.

El objetivo central de este capítulo es entonces dilucidar el papel que cumplen los modelos y leyes en física, en contraste con las ciencias sociales (economía, psicología). Para lograr este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Debatir el significado de ley científica, abordando las distintas controversias generadas alrededor de este concepto: leyes naturales *vs* leyes científicas, leyes *ceteris paribus* en física y en economía, ¿hay verdaderas leyes en las ciencias sociales?, regularidades *nómicas vs* accidentales.
2. Abordar los modelos clásicos de explicación científica y el papel que desempeña la causalidad en dichos modelos: ¿Están las causas físicamente conectadas a sus efectos?, ¿puede haber explicación sin invocar causalidad?
3. Ampliar los debates acerca de la explicación científica al ámbito de la explicación matemática, planteando cuestionamientos tales como: así como se habla de explicación física de fenómenos físicos, ¿se puede hablar de explicación matemática de dichos fenómenos?, ¿es la matemática imprescindible para la ciencia?, ¿los modelos explican o solo tienen una función descriptiva?

Inicialmente, se realizará una discusión sobre los aspectos más controvertidos en relación con el concepto de ley científica. El problema clásico para el análisis filosófico de las leyes científicas radica en diferenciar las genuinas leyes de la naturaleza y las generalizaciones accidentales. Por ejemplo «todos los bloques de oro de 24 K tienen menos de 10000 kg de masa», aunque es verdad no tiene la fuerza de una ley (Halpin, 2003, p. 137). En cambio la afirmación «todos los bloques de oro de 24 K viajan a una velocidad menor que la de la luz», parece ser una ley de la naturaleza (*Ibíd.*, p.138). Para resolver este

²⁰² Entre los modelos de explicación científica clásicos podemos distinguir, entre otros, el modelo nomológico-deductivo (Hempel), los modelos deductivo-estadístico e inductivo-estadístico (Hempel), el modelo de Salmon que introduce factores causales, la pragmática de la explicación de van Fraassen y el modelo unificacionista de Kitcher (Santana, 2006).



problema se ha recurrido a conceptos como el de necesidad nómica²⁰³, relación entre universales²⁰⁴ o relación entre mundos posibles²⁰⁵. Pareciera que mientras no se diferencie de entrada las leyes fundamentales de todo otro tipo de leyes, siempre se encontrará un contraejemplo y será complicado proponer un criterio concluyente para diferenciar leyes científicas y verdades accidentales. Hay muchas generalizaciones empíricas que reciben indistintamente la connotación de ley o también podría ser un modelo (modelo o ley de los gases ideales, modelo o ley del péndulo simple).

Goodman (1983) considera que la diferencia entre las leyes de la naturaleza y las regularidades accidentales tenía que ver con el problema de la inducción: sostiene que si una generalización es accidental no puede ser confirmada por uno de sus casos, como sí ocurre con una sentencia que sí es ley.

En la segunda parte de este capítulo denominada «Explicación en matemática y matemática en la explicación» se tratará de mostrar el poder explicativo y no solo descriptivo de ciertos modelos. Se ha titulado esta sección de esta forma por dos razones fundamentales: en primer lugar, en las ciencias naturales se explican los hechos o fenómenos usando leyes, principios y teorías propias de estas mismas ciencias; que un cuerpo caiga más rápido en la tierra que en la luna se explica por las leyes de Galileo que involucran la aceleración de la gravedad. De la misma forma, y así la matemática no sea una ciencia fundamentada en la experimentación, se pueden sustentar enunciados matemáticos recurriendo a otros enunciados ya aceptados como verdaderos: por ejemplo, para sustentar que la suma de los ángulos interiores de todo triángulo suman dos rectos, me apoyo en axiomas ya aceptados como válidos en la geometría euclidiana (ángulos opuestos por el vértice son iguales, para rectas paralelas cortadas por una secante los ángulos correspondientes son iguales). En segundo lugar, y esto no es tan evidente como en el caso anterior, los modelos matemáticos pueden tener importancia significativa en la explicación de fenómenos físicos concretos.

Además de los debates acerca de los modelos clásicos de explicación se abordarán algunas controversias de gran importancia: así como se habla de explicación física de fenómenos físicos, ¿se puede hablar de explicación matemática de dichos fenómenos?, ¿es la matemática imprescindible para

²⁰³ Las leyes implican más que mera regularidad y en ello se fundamenta su nomicidad. Las leyes son descripciones de lo que puede y debe ocurrir. Se diferencia claramente las leyes de las generalizaciones accidentales, así estas sean verdaderas y universales (Gómez, 2005, p. 128).

²⁰⁴ Armstrong (1978) apela al concepto de universales para distinguir entre leyes y no leyes. En este acercamiento se hace necesario que toda esfera de uranio tenga menos de una milla de diámetro; pero no es necesario que toda esfera de oro tenga menos de una milla de diámetro. Armstrong no utiliza los criterios subjetivos de Lewis (simplicidad, fuerza, mejor equilibrio) (Carroll, 2003, pp. 7-9). Rechaza la idea de que las leyes sean generalizaciones: las leyes consisten en relaciones singulares entre universales o propiedades naturales.

²⁰⁵ Para Lewis (1973) las leyes naturales pertenecen a los buenos sistemas deductivos con la mejor combinación de simplicidad y fuerza. «Todas las esferas de uranio tienen menos de una milla de diámetro» es una ley, porque hace parte de los sistemas deductivos más buenos. «Todas las esferas de oro tienen menos de una milla» no se puede considerar como una ley bajo esta óptica. La teoría cuántica es un muy buen sistema y mostraría lógico que ninguna esfera de uranio puede tener un diámetro de tal magnitud (Carroll, 2003, p. 5). Este acercamiento tiene varios problemas (Ver Carroll, 2003) como no encontrar exclusión entre generalizaciones vacuas y leyes. Lewis (1986) afirma que la diferencia entre generalizaciones accidentalmente verdaderas y leyes verdaderas depende de en qué sistema de verdades aparezcan integradas. No todas las regularidades se convierten en leyes; ello depende del papel que desempeñan en el sistema que figuran como axiomas o teoremas. Una generalización verdadera es una ley si encaja en un sistema integrado de verdades que combinan simplicidad y fuerza de la mejor forma (Gómez, 2005, p. 128). Posteriormente Lewis introduce la probabilidad física en su enfoque (1986; 1994).

4. EL PAPEL DE LA INDUCCIÓN EN LA FORMULACIÓN DE MODELOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Son muchas las formas en que se ha tratado de justificar los argumentos inductivos (Carnap, Reichenbach entre otros) y concretamente en este trabajo se defiende el uso de la inducción desde un punto vista netamente pragmático (ver Norton, 2009). Se encuentra una relación entre la problemática de la inducción y la temática de este trabajo (idealizaciones y aproximaciones) en el hecho de que los modelos probabilistas que de hecho no son cien por ciento ciertos (son aproximados), se obtienen en este capítulo inductivamente. Se puede ver en la siguiente cita como ciertos autores relacionan la inducción con el concepto de aproximación:

A su vez la inducción, es un tipo de razonamiento aproximativo en concordancia con la probabilidad subjetiva o inversa pero que exige la aceptación de un principio de uniformidad de la naturaleza. A largo plazo, la inducción también opera sobre regularidades uniformes, sobre todo cuando extrapolamos sus conclusiones para todos los casos posibles. Sin embargo, en principio la inducción se suele referir a series totalmente aleatorias, generando una expectativa *a priori* meramente subjetiva que tiene que ser confirmada de modo *a posteriori*. La inducción es este modo de razonamiento que aprueba una conclusión como aproximada, porque resulta de un método de inferencia que generalmente lleva a una verdad a largo plazo. (López, 1999, p. 31)

En el proceso de construcción de nuevo conocimiento se han usado generalmente dos tipos de razonamiento: el deductivo y el inductivo²⁹⁴. El hecho de que la inducción sea ampliativa (genera nueva información) ha seducido a gran cantidad de filósofos y científicos que pretenden inferir lo que va a ocurrir en el futuro basándose en las evidencias empíricas del pasado. Dado que la inducción va de premisas particulares a leyes generales, se genera pesimismo en cuanto a su justificación y validez, lo que ha desembocado en interminables debates entre filósofos y científicos en los últimos siglos.

Para abordar el papel de la inducción en la formulación de modelos y así realizar una propuesta novedosa sobre los principales puntos en discordia, se han fijado tres objetivos relacionados con cuestionamientos básicos acerca de la metodología inductiva, respecto a los cuales se defienden unas tesis muy concretas y específicas. Los objetivos fundamentales de este capítulo son:

1. Dilucidar el papel del método inductivo para la generación de nuevo conocimiento, de tal forma que se develen las virtudes y falencias de esta metodología desde una perspectiva pragmática.

²⁹⁴ Como se argumentará posteriormente, para la deducción hay reglas válidas universales, lo que no ocurre con la inducción: *There are no universal rules for induction* (Norton, 2009).

Hay otro tipo de razonamiento muy importante que es la argumentación abductiva, la cual algunos autores identifican con la inferencia a la mejor explicación (Douven, 2011, p. 3) y otros la asemejan a la inducción (Harman, 1965). En las inferencias deductivas, contrario a las inductivas y abductivas, la verdad de las premisas garantiza la verdad de la conclusión. Aunque la abducción puede considerarse como uno de los tres tipos de razonamiento más importantes junto con la inducción y la deducción, en este trabajo se centra la atención sobre los dos últimos por ser más relevantes en la modelización.

2. Justificar el uso de la inferencia inductiva como una de las metodologías apropiadas para aprender de la experiencia, dentro de un contexto concreto y específico.
3. Comprender el alcance y las limitaciones de la estadística inferencial clásica y profundizar en los métodos bayesianos, como una posible alternativa en la solución de problemas, donde el conocimiento subjetivo del investigador tiene un alto grado de ponderación en la toma de decisiones para la solución de estos.

En este capítulo se abordan tres cuestionamientos relacionados con el método inductivo:

4.1.1 ¿Es la estadística clásica inductiva o deductiva?

Tesis: la estadística clásica es inductiva en su aplicación y deductiva en su desarrollo, donde también se deja abierta la posibilidad de obtener modelos inductivamente.

4.1.2 ¿Es posible aprender inductivamente de la experiencia?

Tesis: sí es posible aprender inductivamente de la experiencia usando técnicas estadísticas clásicas y/o bayesianas, siempre y cuando se considere el contexto como un factor determinante para la validez y fiabilidad de estas metodologías²⁹⁵.

4.1.3 ¿Cuál es la metodología estadística más apropiada para la formulación de modelos?

Tesis: ante las limitaciones de los modelos estadísticos clásicos²⁹⁶, el bayesianismo surge como una alternativa para la toma de decisiones, considerando el conocimiento sustantivo del investigador para la solución de un problema específico.

Antes de tratar de dilucidar los tres cuestionamientos mencionados, se abordan brevemente los esquemas clásicos de inducción y los problemas asociados a esta metodología desde una perspectiva moderna.

²⁹⁵ Como se verá posteriormente, hay autores que no conciben un híbrido de estadística clásica y bayesiana; pero aquí se habla de clásica y/o bayesiana, porque en la actualidad las dos metodologías vienen siendo usadas paralelamente sin suponer un dramático cambio de paradigma del frecuentismo por el bayesianismo. De acuerdo con el problema a resolver se adapta mejor una metodología que la otra. Por ejemplo, en epidemiología el bayesianismo es cada vez más utilizado, lo mismo que en el estudio de fenómenos climáticos donde la estadística clásica ha mostrado limitaciones y falencias. Recordemos que, a pesar de los revolucionarios cambios con la física relativista, los ingenieros todavía usan principios de la mecánica newtoniana.

²⁹⁶ La estadística clásica o frecuentista (frecuentista) es la que utiliza los métodos de máxima verosimilitud de Fisher y los intervalos de confianza de Neyman y Pearson (1933). Se diferencia de la estadística bayesiana de De Finetti (1937; 1964; 1974), Savage (1954) y otros, en que no utiliza probabilidades *a priori* como sí lo hace el bayesianismo y, por lo tanto, no tiene en cuenta el conocimiento acumulado que tiene el investigador acerca del problema en cuestión. Además la estadística clásica no puede asignarle probabilidades a una hipótesis (como sí lo hace el bayesianismo) y simplemente la rechaza o se reserva el juicio para no comprometerse aceptándola.

5. CONCLUSIONES

Por tratarse de un trabajo orientado a justificar las abstracciones e idealizaciones desde una perspectiva pragmática, se ha procurado ser muy equilibrado en el abordaje de temas relacionados con la matemática, economía, física o estadística. Por ejemplo, no se puede pretender que se comprendan, por completo, las significativas divergencias entre la estadística clásica y la bayesiana, para lo cual se requiere profundizar en el aspecto netamente matemático de estas disciplinas, ni comprender las relaciones de causalidad que se dan en todos los ámbitos de la física y específicamente en las mecánicas cuántica y relativista. Por esto, en este trabajo quedan varios interrogantes abiertos con posibilidades de ser dilucidados en posteriores investigaciones. De la misma forma hay temas que no se abordan con la profundidad filosófica que ameritan (lógica inductiva, bayesianismo), porque la temática central del trabajo está enfocada en los modelos científicos y las abstracciones y aproximaciones usadas en su construcción justificadas a nivel pragmático o práctico.

En concreto, el objetivo de este trabajo ha sido el de proponer que las idealizaciones y aproximaciones usadas en la formulación de modelos, más que una justificación de tipo matemático o teórico, tienen su justificación desde una perspectiva pragmática como se ha tratado de mostrar a lo largo de toda la tesis. Se ha propuesto mirar las idealizaciones y aproximaciones no como limitantes del modelo, ya que por naturaleza estos son idealizados y aproximados sino usar el modelo como un elemento de juicio que nos permite decidir bajo qué condiciones es útil en la práctica científica.

En la última parte de esta tesis doctoral se tratarán cuatro aspectos básicamente, que proporcionen una visión general de los logros obtenidos y el panorama investigativo que se vislumbra para futuros trabajos³⁵²:

1. Cuestiones consideradas como ya cerradas

Aunque todas las vertientes de la concepción semántica coinciden en el hecho de que las teorías son familias de modelos y no conjuntos de enunciados, se han esgrimido importantes argumentos dentro de esta corriente (Cartwright, 1995b; 1999a; 1999b; Morrison y Morgan, 1999) que favorecen el carácter independiente de los modelos y que prácticamente cierran dos cuestionamientos: los modelos no están todos embebidos en las teorías científicas y hay modelos que se construyen de abajo hacia arriba³⁵³. Hay

³⁵² Es particularmente importante ampliar más concretamente el debate Realismo-Instrumentalismo al campo de la matemática y la economía, porque cuando se abordó la cuestión acerca del poder explicativo de los modelos científicos se observó que se podría entrar en una gran paradoja, lo que ameritaría una profundización en el tema: puede ocurrir que alguien se alinee como realista respecto a la física (postular la existencia de átomos y quarks) y anti-realista respecto a la matemática (no creer en la necesaria existencia de entidades tales como los números y las funciones).

³⁵³ Hay quienes consideran que los modelos se obtienen a partir de las teorías (de arriba abajo), pero se han mostrado varios casos de modelos que se obtienen independiente de estas (de abajo a arriba). Por ejemplo, se ha mostrado en este trabajo cómo el modelo para el péndulo simple se obtiene a partir de las leyes de la mecánica newtoniana (de arriba abajo, de la teoría al modelo) y también se ha mostrado cómo se puede obtener dicho modelo a partir de datos empíricos sin hacer uso de estas leyes y utilizando herramientas estadísticas o matemáticas (de abajo a arriba, de los datos al modelo). Hay muchos modelos que solo se pueden obtener de abajo a arriba, como los modelos de regresión estadística, y otros que



otros cuestionamientos que se abordarán posteriormente, que parecen llegar a un punto donde no hay posibilidades de ampliar el debate o refutar lo que se acepta como cierto en la actualidad.

2. Discusiones en auge

No hay certeza acerca de la decisión sobre el debate frecuentismo vs bayesianismo³⁵⁴, o al menos, que se dilucide una herramienta como superior a la otra. Tampoco se vislumbra una respuesta contundente a ciertos interrogantes abordados a lo largo de este trabajo³⁵⁵.

3. Resultados obtenidos

Aunque no se puede asegurar que en este proyecto se han refutado por completo enfoques referentes a ciertos temas abordados y, mucho menos, que se ha implantado sólidamente una nueva concepción al respecto, se mostraron elementos que aportan a la discusión y que abren posibilidades para ser refinados en futuras investigaciones³⁵⁶.

4. Panorama investigativo relacionado con este proyecto

Aunque afirmar en filosofía de la ciencia que hay discusiones cerradas es aventurado y riesgoso, al observar las tendencias y corrientes que van emergiendo, se va acotando el foco de las discusiones y el horizonte investigativo. Además, el desarrollo tecnológico y científico nos abre la posibilidad de abordar problemas impensables en épocas anteriores o de trabajar con una gran cantidad de variables como en los modelos de simulación o sistemas de ecuaciones estructurales³⁵⁷.

5.1. CUESTIONES CONSIDERADAS COMO YA CERRADAS

Relacionadas con este trabajo hay varias cuestiones que, aunque siguen siendo interesantes, las comunidades científicas y/o filosóficas han alcanzado cierto consenso respecto a estas, que hace

solo se pueden deducir a partir de las teorías (de arriba a abajo). El modelo de Kepler que relaciona el periodo de los planetas con los diámetros de las órbitas se dedujo primero a partir de los datos empíricos (de abajo a arriba) y varias décadas después a partir de la mecánica newtoniana (de arriba a abajo).

³⁵⁴ Aunque no parece vislumbrarse una solución concluyente a este debate, que produzca un efecto tal como que desaparezca una de las dos estadísticas, es evidente que el bayesianismo ha mostrado sus bondades en áreas muy específicas como la epidemiología. Hay cuestiones de mucha complejidad matemática que no se abordan en este trabajo, como por ejemplo aceptar que ambas metodologías puedan convivir y combinarse en el contexto científico.

³⁵⁵ ¿Hay una conexión física necesaria entre causa y efecto? ¿existen algoritmos que permiten descubrir relaciones causales? ¿a través de los modelos se pueden descubrir relaciones causales?

³⁵⁶ Se espera que un aporte nuevo del proyecto es la adición de un quinto elemento a la propuesta de Giere (2004; 2008) relacionada con el carácter representacional de los modelos científicos y sobre la cual se profundizará más adelante: S usa X para representar W con un propósito P (Giere, 2004).

³⁵⁷ En muchas ocasiones se busca al introducir idealizaciones o cláusulas *ceteris paribus* la simplicidad y sencillez en la obtención de los modelos. Específicamente en el campo económico, el uso de sofisticadas herramientas informáticas y de simulación, nos ha permitido trabajar con una cantidad significativa de variables muy complicadas de manejar en conjunto unas pocas décadas atrás, que hacía que no fueran consideradas en el análisis o que se asumiera que permanecían constantes en el periodo de tiempo estipulado. Es el caso de los modelos de inventarios, muy sencillos al considerar constante por ejemplo la demanda y que se van complicando para demandas probabilistas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbot, A. (1998). The causal devolution. *Sociological Methods and Research*, 27, 148-180.
- Achinstein, P. (1968). *Concepts of science*. Baltimore: The John Hopkins Press.
- Aisa, D. (1994). *El razonamiento inductivo en la ciencia y en la prueba judicial*. Zaragoza: Prensas universitarias de Zaragoza.
- Álvarez, S. (1998). La causalidad probabilista y las dificultades del enfoque Humeano. *Theoria*, 13(33), 522-542.
- Apostel, L. (1961). Towards the formal study of models in the non-formal sciences. *Synthese*, 12(2-3), 125-161.
- Armatte, M. (2006). La noción de modelo en las Ciencias Sociales. *Empiria Revista de Metodología de las Ciencias Sociales*, 11, 33-70.
- Armstrong, D. (1978). *A Theory of Universals: Universals and Scientific Realism*. Vol II, Cambridge: Cambridge University Press.
- Armstrong, D. (1983). *¿What is a law of nature?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Bacallao, J. (1996). La perspectiva Exploratorio-confirmatoria en las aplicaciones Biomédicas de la estadística: Dos diálogos. Bayesianismo frente a frecuentalismo: sus respectivas implicaciones prácticas en relación con el análisis de datos. *Medicina Clínica*, 107(12), 467-71.
- Bailer-Jones, D. (2000). Scientific Models as Metaphors. In F. Hallyn, ed. 2000. *Metaphor and analogy in the sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Bailer-Jones, D. (2002). Models, Metaphors and analogies. In P. Machamer y M. Silberstein, eds. 2002 *The Blackwell Guide to the Philosophy of Science*. Oxford: Blackwell Publishers.
- Bailer-Jones, D. (2003). Standing up against tradition: models and theories in Nancy Cartwright's philosophy of science. University of Bonn/University of Pittsburgh. Disponible en:
http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=0NjsnrN9kz4C&oi=fnd&pg=PA17&dq=Bailer-Jones,+D.,+2003.+Standing+up+against+tradition:+models+and+theories+in+Nancy+Cartwright%E2%80%99s+philosophy+of+science&ots=rxe8XGZgog&sig=Sg-uXbdoGQ_sEuSeVfCdKJcZNg#v=onepage&q=Bailer-Jones%2C%20D.%2C%202003.%20Standing%20up%20against%20tradition%3A%20models%20and%20theories%20in%20Nancy%20Cartwright%E2%80%99s%20philosophy%20of%20science&f=false

- Baird, D. (1991). *Experimentación: una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. 2ª ed. México: Prentice Hall.
- Baker, A. (2005). ¿Are there genuine mathematical explanations of physical phenomena? *Mind* 2005, 114(454), 223-238.
- Baker, A. (2008). Experimental Mathematics. *Erkenntnis*, 68, 331-344.
- Balaguer, M. (2008). *Fictionalism in the philosophy of mathematics*. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://www.iep.utm.edu/mathfict/>
- Banegas, J., Rodriguez, F. y Calero, J. (2000). Popper y el problema de la inducción en epidemiología. *Revista Española de Salud Pública*, 74(4), 327-339.
- Bangu, S. (2008). Inference to the best explanation and mathematical realism. *Synthese*, 160, 13-20.
- Barlow, R. (2008). Probability frequentist versus bayesian and why it matters. Manchester University. Disponible en: www.hep.man.ac.uk/u/roger/talks/2008/4.pp
- Batterman, R. (2008). On the explanatory role of mathematics in empirical science. Disponible en: philsci-archive.pitt.edu/4115/1/mapping-expl.pdf
- Black, M. (1962). *Models and Metaphors. Studies in language and philosophy*. Ithaca: Cornell University Press.
- Blalock, H. (1971). *Causal Models in the social sciences*. Chicago: Aldine- Atherton.
- Boersema, D. (2002). Review of Reconsidering logical positivism. *Essays in Philosophy*, 3(13). Disponible en: <http://commons.pacificu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=eip>
- Boltzmann, L. (1902). Models. *Encyclopedia Britannica*. 30, 788-791.
- Boumans, M. (2009). Truth versus precision. In P. Hájek, L. Valdés-Villanueva yD. Westerstahl, eds. 2009. *Logic, methodology and philosophy of science: proceeding of the Twelfth International Congress*. King's College Publications.
- Bovens, L. y Hartmann, S. (2003). *Bayesian Epistemology*. Oxford: Oxford University Press.
- Bovens, L., Hartmann, S. y Hofer, C. eds. 2008. *Nancy Cartwright's Philosophy of Science*. Oxford: Routledge.
- Bunge, M. (1973). *Method, Model and Matter*. Dordrecht: Reidel.
- Bunge, M. (1985). *La investigación científica*. Barcelona: Ariel.



- Bunge, M. (1997). *La ciencia, su método y su filosofía*. Bogotá: Panamericana.
- Bunge, M. (2005). *Buscar la filosofía en las ciencias sociales*. 2^a ed. México: Siglo XXI editores.
- Bustos, E. (2000). *La metáfora. Ensayos transdisciplinarios*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.
- Calvo, D. (2006). *Modelos teóricos y representación del conocimiento*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Canavos, G. (1999). *Probabilidad y estadística*. México: Mc Graw Hill.
- Carnap, R. (1939). Foundations of Logic and Mathematics. *International Encyclopedia of Unified Science*, 1, 139-213.
- Carnap, R. (1966). *Philosophical foundations of physics*. New York: Basic Books.
- Carroll, J. (2003). Laws of Nature. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/laws-of-nature/>
- Cartier, J., Rudolph, J., y Stewart, J. (2001). *The nature and structure of scientific models*. Wisconsin-Madison: University of Wisconsin-Madison.
- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. New York: Oxford University Press.
- Cartwright, N. (1989). *Nature's capacities and Their Measurement*. Oxford: Clarendon Press.
- Cartwright, N. (1991). Fables and Models. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 65, 55-68.
- Cartwright, N. (1995a). Ceteris Paribus laws and socio-economic machines. *The Monist*, 78(3), 276-294.
- Cartwright, N., Shomar, T. y Suárez, M. (1995b). The tool-box of science: tools for building of models with a superconductivity example. In W.E Herfel et al, eds. 1995. *Theories and models in scientific processes*. Rodopi.
- Cartwright, N. (1999a). Models and the limits of theory: Quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity. In M. Morgan and M. Morrison, eds. 1999. *Models as mediator*: Cambridge: Cambridge University Press, 241-281.
- Cartwright, N. (1999b). *The dappled world: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cartwright, N. (2002). In favour of laws that are not Ceteris Paribus after all. *Erkenntnis*, 57, 425-439.

- Cartwright, N. y Suárez, M. (2007). Theories: Tools vs. Models. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 39(1), January 2008, 62-81.
- Cartwright, N. (2009). If no capacities then no credible Worlds. But can models reveal capacities? *Erkenntnis*, 70, 45-58.
- Clark, A. (1989). *Microcognition*. London: Mit Press.
- Coleman, A. (2002). *Scientific Models as works*. Arizona: University of Arizona Press.
- Colyvan, M. (2001). *The Indispensability of Mathematics*. New York: Oxford University Press.
- Colyvan, M. (2008). Indispensability arguments in the philosophy of mathematics. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/mathphil-indis/>
- Cramér, H. (1946). *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton: Princeton University Press.
- Curtis, R. y Reigeluth, C. (1984). The use of Analogies in written text. *Instructional science*, 13(2), 99-117.
- Dayton, E. (2005). Clarence Irving Lewis (1883-1964). *Internet Encyclopedia of Philosophy*. Disponible en: <http://www.iep.utm.edu/lewisci/>
- Davis, P. y Hersh, R. (1998). *The mathematical experience*. New York: Houghton Mifflin.
- Da Costa, N. y French, S. (2004). *Science and partial truth: A unitary Approach to Models and Scientific reasoning*. Oxford: Oxford University Press.
- De Donato, X. (2005). *Idealization and the growth of physics: a contribution to the methodology of science*. Tesis doctoral. Ludwig-Maximilians University, Munich.
- De Donato, X. (2007). El carácter de los tipos ideales Weberianos y su relación con las ciencias naturales. *Dianoia*, LII(59), 152-177.
- De Finetti, B. (1937). La prevision: ses lois logiques, ses sources subjective. *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, 7, 1-68.
- De Finetti, B. (1964). Foresight: its logical laws, its subjective Sources. A translation by H. Kyburg of (Finetti1937). In H. Kyburgand y H. Smokler, eds. 1964. *Studies in Subjective Probability*, New York: John Wiley and Sons.
- De Finetti, B. (1974). *Theory of Probability in two volumes*. New York: John Wiley and Sons.
- De Lorenzo, J. (1993). Aportes epistemológicos del hacer matemático. *Ideas y Valores*, 92, 79-95.



- Díaz, M. (2007). *Viabilidad de la enseñanza de la inferencia bayesiana en el análisis de datos en psicología*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada.
- Diéguez, A. (1998). *El Realismo científico una introducción al debate actual en filosofía de la ciencia*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Díez, J. y Moulines U. (1999). *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. 2ª ed. Barcelona: Ariel.
- Díez, J. (2002). Explicación, unificación y subsunción. Institut D'Estudis Avançats, Universitat Rovira i Virgili. Disponible en: <http://www.scribd.com/.../Jose-A-Diez-La-explicacion-cientifica-como-subsuncion-teorica>.
- Domazet, M. (2006). Philosophy of science in action. *Prolegomena*, 5(2), 231-245.
- Douven, I. (2011). Abduction. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/abduction/>
- Doval, H. (2004). Acerca de la probabilidad, la probabilidad condicional y el teorema de Bayes. *Revista Argentina de Cardiología*, 72(04), 1-13.
- Dowe, P. (1992). Wesley Salmon's process theory of causality and the conserved quantity theory. *Philosophy of Science*, 59(2), 195-216.
- Dowe, P. (2000). *Physical Causation*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Dowe, P. (2004). Causes are physically connected to their effects: why preventers and omissions are not causes. In C. Hitchcock, ed. 2004. *Contemporary Debates in Philosophy of Science*. Oxford: Blackwell.
- Ducheyne, S. (2008). Towards an ontology of scientific models. *Metaphysica*, 9(1), 119-12.
- Duhem, P. (1914). *The aim and structure of physical theory*. Princeton: Princeton University Press, 1954.
- Dummett, M. (1991). *The Logical Basis of Metaphysics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Earman, J., Roberts, J. y Smith, S. (2002). Ceteris Paribus lost. *Erkenntnis*, 57, 281-301.
- Echeverría, J. (1998a). Similaridades, isomorfismos y homeomorfismos entre representaciones científicas. *Theoría*, 13(I), 89-112.
- Echeverría, J. (1998b). *Filosofía de la Ciencia*. Madrid: Akal.
- Einstein, A. (1921). *Geometría y experiencia*. Madrid: Alianza.

- Escrig, J., Martínez, D. y Miralles, J. (2006). Pruebas Diagnósticas: nociones básicas para su correcta interpretación y uso. *Cirugía Española*. 79, 267-273.
- Fahmi, M. (2008). *Mathematical models in science: A debate about ontology*. Philsci Archive. Disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/3904/>
- Falguera, J. (1993). La naturaleza representacional de los modelos. *Éndoxa*. (3), 7-29.
- Fernández, J., González, B. y Moreno, T. (2004). Consideraciones acerca de la investigación en analogías. *Estudios Fronterizos*, 5(9), 79-105.
- Field, H. (1980). *Science Without Numbers: A Defence of Nominalism*. Oxford: Blackwell.
- Fisher, R. (1922). On the Mathematical foundations of theoretical Statistics. *Philosophical transactions of The Royal society of London*. Series A, 222, 309-368.
- Fleming, W. y Varberg, D. (1991). *Algebra and trigonometry whit analític geometry*. 3ª ed. México: Prentice Hall.
- Freedman, D. (1987). As others see us: a case study in path analysis. *Journal of educational studies*, 12, 121-128.
- Freedman, D. (1997). From association to causation via regression. *Advances in Applied Mathematics*, 18, 59-110.
- Freedman, D. (1998). *¿Are there algorithms that discover causal structure?*. Sacramento: University of California.
- Friedman, M. (1953). *The methodology of positive economics*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Friedman, M. (1974). Explanation and Scientific Understanding. *Journal of Philosophy*, 71, 5-19.
- Friedman, M. (1999). *Reconsidering Logical Positivism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Frigg, R. (2002). *Models and representations: Why structures are not enough*. Disponible en: http://www.romanfrigg.org/writings/Models_and_Representation.pdf
- Frigg, R. y Hartmann S. (2006). *Models in science*. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/models-science/>
- Frigg, R. y Reiss, J. (2009). *The philosophy of simulation: hot new issues or same old stew?* Disponible en: http://www.romanfrigg.org/writings/Synthese_Simulation.pdf



- Fuchs, C. (2004). Science as self-organizing meta-information system. *Social Science Research Network*. Disponible en: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=504244
- Galagovski, L. y Aduriz, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias 2001, 19(2)*, 231-242.
- Gentner, D. (1989). The mechanism of analogical learning. In Vosniadou y Ortony, eds. 1989. *Similarity and Analogical reasoning*. Cambridge: Cambridge University Press
- Gentner, D. y Jeziorski, M. (1993). The shift from metaphor to analogy in western science . In A . Ortony, ed. 1993. *Metaphor and Thought*. 2a ed. Cambridge, England: Cambridge University Press
- Giere, R. (1985). La filosofía de la ciencia naturalizada. En A. Ambrogi, ed. 1985. *Filosofía de la Ciencia: el giro naturalista*. Palma: Universitat de les Illes Balears.
- Giere, R. (1988). *Explaining science: a cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. (2003). Models, metaphysics, and methodology. In S. Hartmann, C. Hofer y L. Bovens, eds. 2008. *Nancy Cartwright's Philosophy of Science* London: Routledge.
- Giere, R. (2004). How model are used to represent reality. *Philosophy of Science 71(8)*, 742-752.
- Giere, R. (2008). An agent-based conception of models and scientific representation. *Philosophy of Science, 76(1)*, 101-111.
- Giordano, F.; Weir, M. y Fox, W. (1997). *A first course in mathematical modeling*. Brooks/Cole Publishing Company.
- Glennan, S. (2000). *A model of models*. Disponible en: philsci-archive.pitt.edu/1134/1/Models1.4.pdf
- Glymour, C., Scheines, R., Spirtes, P. y Kelly, K. (1987). *Discovering causal structure: artificial intelligence, philosophy of science, and statistical modeling*. Orlando: Academic Press.
- Glymour, C. (1996). Why I am not a bayesian. In D.d Papineau, ed. 1996. *The Philosophy of Science*. Oxford: Oxford University Press
- Gómez, A. (2005). *Filosofía y metodología de las ciencias sociales*. Madrid: Alianza editorial.
- Goodman, N. (1983). *Fact, fiction, and forecast*. Cambridge: Harvard University Press.
- Grilles, M. y Mora, J. (2003). *Modelos matemáticos y regresión. El zoom de la cámara fotográfica*. Disponible en: <http://terra.es/personal/joseantm/>
- Guerrero, G. (2000). Determinismo, modelos y modalidades. *Revista de Filosofía, XIII(24)*, 191-216.

- Guerrero, G. (2003). *Enfoque semántico de las teorías estructuralismo y espacio de estados: coincidencias y divergencias*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Haack, S. (2004). Pragmatism, old and new. *Contemporary Pragmatism*. 1(1), 3-41.
- Hacking, I. (1998). *Representar e intervenir*. Barcelona: Paidós.
- Haefner, J. (2005). *Modeling Biological System: Principles and Applications*. 2^a ed. New York: Springer Publishers.
- Halpin, J. (2003). Scientific law: a perspectival account. *Erkenntnis*, 58, 137-168.
- Hanson, R. (1958). *Observation and explanation: a guide to Philosophy of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harris, T. (2002). *Data model and the acquisition and manipulation of data*. Disponible en: <http://philsci-archivepitt.edu/archive/00001074/>
- Hart, H. y Honor, A. (1965). *Causation in the law*. Oxford: Clarendon Press.
- Harman, G. (1965). The Inference to the Best Explanation, *Philosophical Review*, 74, 88-95.
- Hartmann, S. (2005a). *Model as a tool for theory construction: some strategies of preliminary physics*. Disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/2410/>
- Hartmann, S. (2005b). *The world as a process: simulation in the natural and social sciences*. Disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/2412/>
- Hartmann, S. (2006). *Modeling in Philosophy of Science*. Disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/3630/>
- Hausman, D. (1992). *The inexact and separate science of economics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hausman, D. (2008). Philosophy of economics. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/economics/>
- Hayek, F. (1953). *The sensory order*. Chicago: University of Chicago.
- Hecht, E. (1999). *Física en perspectiva*. México: Editorial Addison Wesley Longman.
- Heidelberger, M. (2004). *Models in fluid Dynamics*. Disponible en: http://philsci-archive.pitt.edu/...Heidelberger_Models_in_Fluid_Dynamics_corrected.pdf



- Hempel, C. y Oppenheim, P. (1948). Studies in the logic of explanation. *Philosophy of Science*, 15(2), 135-175.
- Hempel, C. (1965). *Aspectos de la explicación científica*. Buenos Aires: Paidós.
- Hempel, C. (1966). *Philosophy of the natural science*. Madrid: Alianza.
- Hendry, R. y Psillos, S. (1998). *How to do things with theories an interactive view of language and models in science*. Disponible en: philsci-archive.pitt.edu/1134/1/Models1.4.pdf
- Hesse, M. (1953). Models in Physics. *The British journal for the philosophy of science*, 4(15) 198-214.
- Hesse, M. (1966). *Models and analogies in Science*. Notre Dame: University of Notre Dame Press.
- Hewitt, P. y Robinson, P. (1998). *Manual de laboratorio de física*. México: Adison Wesley Longman.
- Hill, A. (1965). The environment and disease: ¿Association or causation? *Proceedings Royal Society Medicine*, 58, 295-300.
- Hitchcock, C. (2002). *Probabilistic causation*. Stanford: Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/causation-probabilistic/>
- Hitchcock, C. (2004). *Contemporary debates in philosophy of science*. Oxford: Blackwell.
- Hookway, C. (2008). Pragmatism. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2010/entries/pragmatism/>
- Horsten, L. (2007). *Philosophy of Mathematics*. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/entries/philosophy-mathematics/>.
- Ho Yu, CH. (2002). *A philosophical investigation of causal interpretation in structural equation models*. Arizona State University. Disponible en: philsci-archive.pitt.edu/1134/1/Models1.4.pdf
- Hume, D. (1748). *An enquiry concerning human understanding*. New York: Dover, 2004.
- Hunter, B. (2008). *Clarence Irving Lewis*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Disponible en: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/lewis-ci/>
- Ibarra, A. y Larrañaga, J. (2007). ¿Los modelos de la ecología de poblaciones como representaciones interventivas? *Representaciones*, 3(2), 43-62.
- Ibarra, A. y Mormann, T. (1997a). *Representaciones en la ciencia: de la invariancia estructural a la significatividad pragmática*. Barcelona: Ediciones del Bronce.

- Ibarra, A. y Mormann, T. (1997b). Theories as Representations. *Poznan studies in the philosophy of sciences and the humanities*, 61, 59-97.
- Ibarra, A. y Mormann, T. (2000). Una teoría combinatoria de las representaciones científicas. *Crítica Revista Hispanoamericana de Filosofía*, XXXII (95), 3-46.
- Ibarra, A. y Mormann, T. (2005). Interactive Representations. *Representaciones*, 1(1), 1-20.
- Ibarra, A. y Mormann, T. (2006). Scientific theories as intervening representations. *Theoria*, 21(1), 21-38.
- Jeffrey, R. (1983). *The Logic of Decision*. 2a ed. Chicago: The University of Chicago Press.
- Joreskog, K. y Sorbom, D. (1986). *Model Search with Tetrad II and Lisrel*. Uppsala: University of Uppsala.
- Juez P. y Díez, F. (1997). *Probabilidad y estadística en medicina*. Madrid: Ediciones Diaz Santos.
- Justi, R. (2006). La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las ciencias*, 24(2), 173-184.
- Kant, I. (1781). *Crítica de la razón pura, Tomo I: Estética trascendental y Analítica trascendental*. Traducido por J. Del Perojo. Bogotá: Ediciones Universales, 1997.
- Kelly, T. (2009). Hume, Norton, and induction without rules. Princeton University. Disponible en: [http://www.princeton.edu/~tkelly/papers/PSA %20Symposium.doc](http://www.princeton.edu/~tkelly/papers/PSA%20Symposium.doc)
- Kincaid, H. (2004). *There are laws in the social sciences*. In C. Hitchcock, ed. 2004. *Contemporary Debates in Philosophy of Science*. Malden, MA:: Blackwell.
- Kitcher, P. (1981). Explanatory Unification. *Philosophy of Science*, 48, 507-531.
- Kitcher, P. (1989). Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In P. Kitcher y W. Salmon, eds. 1989. *Scientific Explanation.*, Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Knuuttila, T. y Voutilainen, A. (2002). *A parser as an epistemic artefact: a material view on models*. Disponible en: <http://philsci-archive.pitt.edu/1080/>
- Knuuttila, T. (2004). Models, representation, and mediation. *Philosophy of Science*, 72, pp. 1260-1271.
- Knuuttila, T. (2005). *Representation and Realism in Economics: From the assumptions Issue to the epistemology of modelling*. Helsinki: University of Helsinki.
- Koperski, J. (2006). *Models*. Disponible en: <http://www.iep.utm.edu/models/>

DAIRON ALBERTO ARBOLEDA QUINTERO

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Gestión Energética Industrial y PhD Universidad del País Vasco (España). Docente titular del Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM-.



Las fuentes tipográficas empleadas son Baskerville Old
Fondo Editorial ITM
Diciembre de 2014

En este texto se dilucidan varios cuestionamientos relacionados con los modelos usados en ciencia desde una perspectiva filosófica: ¿Qué es un modelo y cómo se clasifican? ¿Cuál es la función del modelo: representar o intervenir la realidad? ¿Los modelos tienen poder explicativo o solo pueden describir los fenómenos? ¿Existen algoritmos computacionales para descubrir relaciones causales? También se hace una defensa del método inductivo y se argumenta que la estadística clásica es deductiva en su axiomatización pero inductiva en su aplicación. Los debates se centran básicamente en las idealizaciones y aproximaciones usadas en la construcción de modelos y se justifica su uso en un contexto pragmático, mostrando que las idealizaciones son la norma y no la excepción en la ciencia, porque a nivel general es reconocido que los modelos son inexactos y por lo tanto, manipulables y mejorables por parte del investigador. No se discute si los modelos son verdaderos o falsos sino más bien si son útiles o inútiles, bajo ciertas condiciones que debe conocer el usuario de estos.

From a philosophical point of view, this text sheds light on different questions regarding models used in science. What is a model and how are models classified? What is the function of a model: to represent or to intervene in reality? Do models have the power to explain or can they just describe phenomena? Are there computational algorithms to discover causal relationships? The text also defends the inductive method and argues that classical statistics is deductive in its axiomatization but inductive in its application. The debates basically focus on the idealizations and approximations used in the construction of models, and this use is justified in a pragmatic context, showing that these idealizations are the norm and not the exception in science, because in general terms it is accepted that models are not accurate and therefore, they are likely to be adjusted and improved by the investigator. The text does not discuss whether models are true or false, but rather whether they are useful or not, under certain conditions that the user must know.



Institución Universitaria

