



LOS CAMINOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Segundo Gutiérrez Cabria



CÁTEDRA
DE EMÉRITOS
de la Comunidad Valenciana



LOS CAMINOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Segundo Gutiérrez Cabria

Edita: ©



ÁTEDRA
DE EMÉRITOS
de la Comunidad Valenciana

Avda. Campanar, 57 - 46009 Valencia - Tel. 96 349 21 63

e-mail: catedraemeritos@funcae.es - www.catedraemeritos.com

Autor:

© Segundo Gutiérrez Cabria

Coordinan:

Concha Albalat Criado

Amando García Rodríguez

Salvador Aldana Fernández

Juan Cuenca Anaya

D. L.: V-4231-2009

Maquetación e impresión:

Gráficas Antolín Martínez. s.l.

Tel. 96 391 89 84 - www.grafamar.com

Índice

Presentación	7
1. Introducción	9
1.1. Ciencia, racionalidad	9
1.2. Lógica y niveles de conocimiento	12
1.3. Estructura de una ciencia ideal	14
1.4. Los objetos y su naturaleza estadística	15
1.5. Los científicos y la metodología	17
2. Ideas generales sobre el método de las ciencias.....	21
2.1. Introducción	21
2.2. Deducción, reducción e inducción.....	22
2.3. Concepto y características del método científico.....	24
2.4. Etapas del método científico.....	26
2.5. Debate en torno al método científico	31
3. El método estadístico	35
3.1. Formulación del método estadístico.....	35
3.2. Aportación de la estadística al método científico.....	37
3.3. Descripción, explicación y predicción	39
3.4. La investigación y el método científico	40
3. 4. 1. Ideas generales	40
3. 4. 1. Etapas de la investigación científica	42
4. La descripción estadística	45
4.1. Introducción	45
4.2. La recogida de datos	46
4.2.1. La información estadística. Datos y observaciones	46
4.2.2. Diseño del experimento	50
4.2.3. Circunstancias de la recogida de datos.....	52

4.2.4. Tipos de recogida de datos.....	54
4.2.5. Centros de recogida de datos	56
4.3. Clasificación de datos	57
4.3.1. Generalidades	57
4.3.2. Aplicaciones y problemas prácticos.....	62
4.4. La reducción de datos	63
4.5. La interpretación de los datos.....	65
4.6. El razonamiento estadístico.....	66
4.7. La confrontación de resultados	67
5. La explicación	71
5.1. Introducción	71
5.2. La explicación científica	72
5.3. La lógica de la explicación.....	74
5.4. La explicación deductiva nomológica	76
5.5. La explicación estadística.....	78
5.5.1. La explicación estadística deductiva.....	78
5.5.2. La explicación estadística inductiva.....	79
6. La predicción.....	83
6.1. Predicción y explicación	83
6.2. Estructura lógica de la predicción.....	84
6.3. La explicación estadística en las ciencias.....	86
6.4. Algunos ejemplos de predicción científica.....	88
7. La modelización	93
7.1. Modelos	93
7. 2. Algunos ejemplos de modelos probabilísticos.....	95
7.3. El modelo estadístico	97

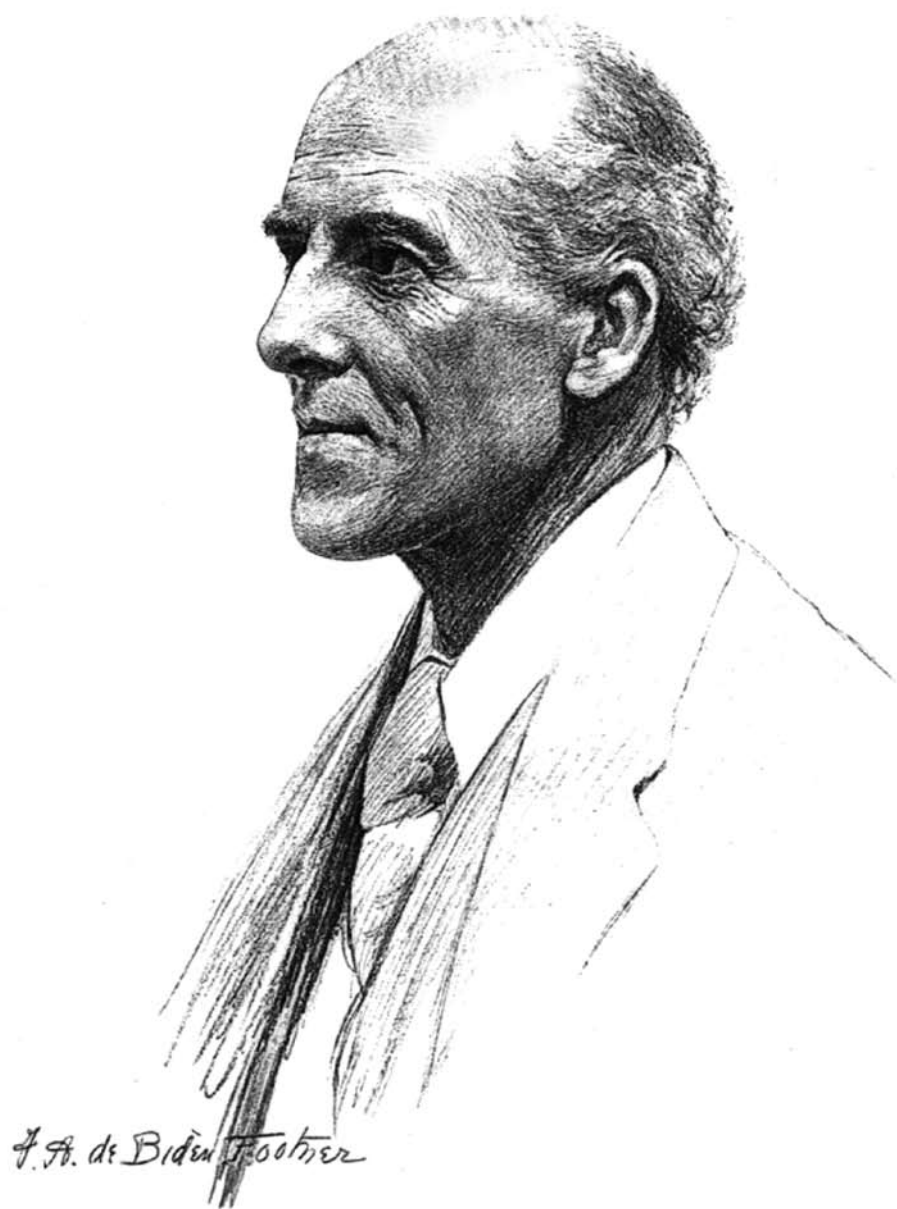
Presentación

Toda investigación persigue una meta y esta meta exige conocer el camino que conduce a ella. Los caminos de una investigación científica, su sistemática, son el método científico en general. El método científico no sólo guía al investigador, impidiendo que se separe del camino correcto, sino que le ayuda a generar nuevas ideas. El científico que se ocupa de una determinada investigación se encuentra con una estructura ya organizada de las doctrinas científicas. Las conclusiones de la ciencia, a diferencia de las que emanan del sentido común o de las creencias, son, precisamente, los productos del método científico.

El estudio de la metodología científica, aunque disciplina académica por derecho propio, es impopular entre los científicos. Pocos científicos han escrito sobre ella y pocos han recibido instrucción formal acerca del método científico en general, aparte del que utilizan en su disciplina.

Estas consideraciones nos han movido a escribir este ensayo, con la idea de ayudar al investigador científico a subsanar una posible carencia en los aspectos más generales del método científico.

En el primer capítulo se exponen los rudimentos de la lógica del conocimiento científico y la estructura de una ciencia ideal. En el segundo, describimos las etapas del método científico en general, y las particularidades que ofrece la metodología de las ciencias. El tercer capítulo se ocupa de las particularidades del método estadístico, el más utilizado hoy en la investigación, y, para nosotros, la parte más importante del método científico, si no el método por excelencia. Los tres capítulos siguientes estudian las tres fases del método: la descripción, la explicación y la predicción. Termina el ensayo con un capítulo sobre la modelización.



Karl Pearson

1. Introducción

1.1. Ciencia y racionalidad

La idea de ciencia, tal como fue elaborada ya por el pensamiento griego, es la de un conocimiento organizado siguiendo unos principios. Esto puede hacerse de dos formas que, por otra parte, son complementarias. En primer lugar, puede tratarse de un conocimiento que se presenta en forma de proposiciones que se derivan de ciertos enunciados, de los que se tienen razones bien fundadas para considerarlos básicos. De estos enunciados, mediante un sistema deductivo que proporciona la lógica clásica, se obtienen nuevas proposiciones. Este tipo de conocimiento es el que se da en las ciencias puramente formales. Puede ser, en segundo lugar, un conocimiento, el que se da en las ciencias empíricas, que se construye y se desarrolla según ciertas reglas. Estas reglas están dictadas por la llamada "lógica del conocimiento científico", según denominación de **Tavanec y Svirev**¹, o "lógica de la investigación científica", según **Popper**², o simplemente "lógica del conocimiento", como la llama **Carnap**³.

Las ciencias puramente formales son las matemáticas y la lógica formal. Estas disciplinas pueden construirse en forma puramente deductiva. Aparecen entonces como teorías formales, esto es, como una clase de proposiciones que puede ser creada a partir de algunas de ellas – los *axiomas* – mediante la intervención de reglas deductivas explícitamente formulables. Como la deducción propaga la verdad, la validez de las proposiciones de un sistema depende de la de los

¹ P.V. Tavanec, *Problems of the Logic of Scientific Knowledge*, en P. V. Tavanec y W. S. Svirev (eds.), *The Logic of Scientific Knowledge* (Dordrecht 1962).

² K. Popper, *Logik der Forschung* (Viena 1934). Trad. Española: *La lógica de la investigación científica* (Madrid 1967).

³ R. Carnap, *The Logical Foundations of Probability Theory* (Chicago 1937).

axiomas. En las construcciones euclídeas, los axiomas se consideraban evidentes por sí mismos. En las axiomáticas modernas se les conceptúa como proposiciones cuya validez se supone admitida. La finalidad de un sistema axiomático es caracterizar ciertas entidades ideales que pertenecen al dominio de los entes lógico-matemáticos, como los números, los espacios y las funciones. Cualesquiera sean los problemas ontológicos que se presenten en este terreno, no existe una aprehensión empírica de estos entes, y sólo pueden captarse a través de construcciones cuya representación proporcionan las teorías formales.

Las *ciencias empíricas* más sencillas son las *descriptivas*. Su método de construcción es el inductivo, que conlleva argumentar de lo particular a lo general o inferir una ley de particulares instancias. El conocimiento se obtendría amasando grandes cantidades de datos y hechos, de modo que surja de ellos la verdad en forma de leyes universales. El punto de partida son las observaciones simples o *protocolarias* (llamadas así por **Neurath** porque son como los protocolos en los que los notarios registran los hechos de los que han de dar fe). Estas observaciones, debidamente clasificadas y analizadas mediante el razonamiento, conducen al investigador a conclusiones que formula en forma de *proposiciones universales sintéticas*. Estas proposiciones, una vez contrastadas por la realización de nuevos experimentos, se transforman en *leyes empíricas*. Estas leyes, junto con otras proposiciones singulares, ofrecen la posibilidad de hacer previsiones. Un ejemplo típico de estas ciencias es la botánica.

Las *ciencias empírico-formales*, con la física como modelo, toman como base de investigación porciones convenientemente aisladas de la realidad empírica, y emplean los recursos de las ciencias formales juntamente con los procedimientos del control empírico. A semejanza de las teorías formales, se presentan en forma deductiva. Las proposiciones iniciales, que desempeñan el papel de axiomas en la estructura deductiva, enuncian unas relaciones de carácter muy general, cuya categoría metodológica es la *hipótesis*. Algunas de las proposiciones que se pueden deducir deben poder ponerse en relación con otras puramente empíricas, que expresan resultados de observaciones, mediante reglas de interpretación apropiadas. La teoría debe estar construida de tal manera que sea posible, con

la interpretación y la deducción, controlar su validez por medio de pruebas de carácter experimental. La función de la hipótesis es procurar un principio que contiene de antemano, en alguna forma y de modo virtual, el conjunto de los datos experimentales ya conocidos o potencialmente accesibles, relativos al campo considerado. Para que una construcción de este tipo sea eficaz es necesario que se puedan asociar significaciones reales –interpretaciones semánticas– a las entidades matemáticas empleadas

Su construcción es un ir y venir del *mundo de los conceptos* (conjeturas, modelos, hipótesis, teorías) al *mundo de los hechos* (realidad empírica). De las proposiciones empíricas, mediante la inducción, y por un proceso de abstracción, formulamos hipótesis, de las que por deducción obtenemos conclusiones que han de ser contrastadas con la realidad. Si éstas no merecen aprobación, formulamos nuevas hipótesis que han de ser también contrastadas. El proceso continúa tantas veces como sea necesario. El método suele llamarse *hipotético-deductivo*, pues se alude en él a dos direcciones: es hipotético, por cuanto se construyen hipótesis explicativas de unos hechos observados; es deductivo, por cuanto se deducen de las hipótesis unos hechos verificables.

Toda conclusión obtenida como resultado del análisis de los datos ha de ser convalidada. Este intento de convalidación nos conducirá a su confirmación o a su rechazo. El modo natural de llevar a cabo la *convalidación* de las conclusiones de un análisis de datos consiste en la comparación con nuevos datos. Distinguimos la convalidación propiamente dicha de la *contrastación*. La convalidación confronta las conclusiones derivadas de unos datos con las que se deducen de nuevos datos; la contrastación confronta conclusiones empíricas con modelos teóricos, pone a prueba las teorías ante el tribunal de la experiencia. Evidentemente, el método descriptivo conduce a la convalidación y el hipotético-deductivo a la contrastación.

En los dos casos de las ciencias formales y empírico-formales existen principios que regulan un despliegue discursivo, ya sean axiomas, ya sean hipótesis de índole representativa o interpretativa. En todos los casos la ciencia es un tipo de conocimiento que progresa a través de una investigación metódica, fiel a unos criterios precisos,

razonados, afinados con regularidad y controlados en cuanto a su eficacia.

Estas ideas generales van a ser desarrolladas en los capítulos siguientes, partiendo siempre del principio de que la verdad no es patrimonio exclusivo de la ciencia, que sólo define un modo de pensar reducido a la realidad empírica observable.

La idea general de racionalidad rebasa el marco de la ciencia y del conocimiento, aunque hoy se reconoce que la ciencia es el modelo por excelencia de un conocimiento racional y que es el método científico el que proporciona el modelo de un sistema de acción racional. Pero el análisis de la racionalidad científica conduce al reconocimiento de un concepto de razón más amplio que el de razón científica. El ser humano posee una capacidad de discernimiento y de autocomprensión que se manifiesta no sólo en el esfuerzo científico, sino también en el pensamiento analítico, en el sentido filosófico del término, es decir, como una empresa que pretende aclarar conceptos y controlar las actividades del espíritu, y también en el pensamiento especulativo, que intenta elaborar un esquema conceptual capaz de alcanzar las estructuras fundamentales de la experiencia, y así la totalidad de lo real. La razón se siente capaz de fundamentar radicalmente la acción, considerada no en sus manifestaciones particulares y localizadas, sino como dinamismo constitutivo de la existencia. La razón especulativa aparece así como una garantía de la razón práctica.

La razón adopta modalidades diferentes. Una es la que actúa en matemáticas, otra la que orienta los descubrimientos físicos, otra la que opera en la filosofía o en la creencia religiosa, otra la que guía la voluntad libre en el quehacer diario y frente a diversas motivaciones.

1.2. Lógica y niveles de conocimiento

La lógica del conocimiento científico, a la que nos hemos referido ya, es de construcción reciente. Debido al escaso desarrollo de las ciencias basadas en la observación de la naturaleza en la Antigüedad y en la Edad Media, la lógica no tuvo que enfrentarse con problemas metodológicos. Para **Aristóteles** (*Analíticos posteriores*) la tarea primaria de la lógica consistía en demostrar de dónde obtiene el discurso su poder de persuasión; qué discurso debe hacerse a fin de llevar a

las gentes a concordar en algo o llamar falso a algo. Esta misma idea predominó en la lógica medieval. Con el avance de las matemáticas y las ciencias naturales durante el Renacimiento, la lógica debió responder a nuevas exigencias: proporcionar medios y métodos que sirvieran de guía al científico en sus investigaciones en el amplio dominio del mundo real. Respondiendo a este desafío, **Francis Bacon** y, con posterioridad a él, otras mentes preclaras, intentaron desarrollar la lógica como instrumento de la investigación y del descubrimiento de nuevas verdades. Bacon es considerado como fundador del llamado método inductivo, tal como se utiliza en la ciencia actual, aunque ya Aristóteles concibiera la idea básica de proceder de lo particular a lo general. La construcción de una lógica inductiva fue una preocupación de **Stuart Mill** y **Herschell**, entre otros.

La lógica del conocimiento científico nos ayuda a distinguir los diversos modos de dominar claramente la realidad del mundo. A primera vista nos hace discernir claramente dos niveles de conocimiento. El primer nivel, el *empírico*, está basado en un sistema de análisis de la realidad destinado a describir el mundo lo más exactamente posible en toda su diversidad. El segundo nivel, el nivel *teórico*, está también basado en la *esquematización* e *idealización* de la realidad; está orientado, no a la simple descripción, sino a la penetración en la esencia del proceso estudiado.

Los objetos empíricos son así *porciones de la realidad*, vistos desde un cierto ángulo y con la ayuda de cierta esquematización. Los objetos teóricos, por el contrario, son *construcciones ideales* de esa realidad. Punto y cuerpo rígido indeformable son objetos teóricos; carne y productos de la tierra son empíricos.

Es difícil fijar, a veces, las fronteras entre lo teórico y lo empírico.

En correspondencia con la distinción entre objetos empíricos y teóricos está la de los *lenguajes* de la ciencia actual: lenguajes empíricos y lenguajes teóricos. *La explicación de hechos empíricos mediante términos teóricos constituye la esencia de la explicación científica.*

Al hablar de niveles de conocimiento hay que especificar el tipo de enunciado y el lenguaje en el que se formula. De acuerdo con lo

anterior, podemos dividir el lenguaje de la ciencia en tres sublenguajes: Lenguaje de *observación*, lenguaje de *construcciones empíricas* y lenguaje de *construcciones teóricas*. El primero contiene sólo enunciados que expresan hechos individuales, pues sólo ellos contienen términos de observación. El segundo expresa hechos individuales y oraciones que expresan conexiones empíricas (hechos generales, leyes empíricas). En el tercero hay enunciados de tres clases: de sistemas de objetos distintos de los observados, de oraciones relativas a objetos posibles, y de reglas que hagan posible el paso de oraciones del sublenguaje segundo al primero, esto es, de conocimiento de objetos teóricos a conocimiento de objetos empíricos.

1.3. Estructura de una ciencia ideal

De la ciencia se dan muchas definiciones siguiendo diversos enfoques. Nos quedaremos con ésta de **Rakítov**⁴ que se acomoda a los fines que persigue este trabajo: *Ciencia es un sistema de proposiciones que son descripciones lógicas de conocimiento acerca de conexiones, relaciones y propiedades del objeto estudiado.*

Una ciencia ideal -por ejemplo, la física- comprende:

a) El *objeto* o substancia de esa ciencia, que es el conjunto de proposiciones que expresan tareas, problemas y cuestiones que enmarcan la dirección y carácter de la investigación.

b) La *teoría e hipótesis*, o sea, el conjunto de proposiciones que contienen conocimiento acerca de las leyes, proposiciones básicas y relaciones de los objetos investigados. Sirven para caracterizar y seleccionar los modelos. Éstos serán más o menos representativos según que las hipótesis que sirvieron de punto de partida estén más o menos alejadas de la realidad.

c) El *método*, que consta de los enunciados que formulan las reglas y procedimientos necesarios para obtener nuevo conocimiento.

d) Los *hechos*, conjunto de proposiciones que describen el conocimiento adquirido directamente por la experimentación y observación de los fenómenos. Los hechos de las ciencias de la naturaleza son mirados desde el exterior; los de las ciencias sociales admiten,

⁴ A. N. Rakítov, *The Statistical Interpretation of Fact and role of Statistical Methods in the Structure of Empirical Knowledge* (eds.) P. V. Tavanec y W. S. Svyrev, (Dordrecht 1989).

en cambio, la posibilidad de ser examinados desde “dentro”, por introspección.

El estudio de la estructura lógica del conocimiento científico y de las leyes de funcionamiento de los sistemas científicos exige el análisis cuidadoso de cada uno de sus componentes.

Cuando se dice que la estructura de la ciencia incluye hechos, se quiere significar que *las proposiciones empíricas son descripciones lógicas de actividades científicas experimentales*. El problema está en explicar la naturaleza lógica de las proposiciones empíricas dentro de la estructura de la ciencia, las relaciones entre ellas y los objetos empíricos, y la estructura y métodos de construcción del conocimiento empírico.

1.4. Los objetos y su naturaleza estadística

Dentro de la estructura del proceso de obtención del conocimiento empírico, es necesario indagar la *relación entre este conocimiento y el objeto estudiado*.

Ante todo hay que distinguir entre el *objeto* de la investigación y aquéllos de sus aspectos, propiedades y relaciones que constituyen los *objetivos* a investigar, y que nunca cubren exhaustivamente “el objeto”. En un estudio cuyo objeto sea la población española los objetivos pueden ser la estatura, la edad, la relación entre ambas, etc. En un estudio sobre balística podemos proponernos como objeto concreto el estudio de un misil, y los objetivos pueden ser la trayectoria, la velocidad, etc. En un estudio cuyo objeto son las moléculas de un gas podemos tomar como objetivo el estudio de las trayectorias seguidas en el movimiento cinético por esas moléculas.

Para que el conocimiento de los objetivos, basado en la investigación experimental, sea de interés científico, esto es, sea considerado como *hecho científico*, es preciso llevar a cabo una serie de operaciones: medir, pesar, etc., con varios instrumentos. La precisión de estas operaciones depende de diversos factores: naturaleza del objeto mismo, estado del mecanismo experimental, subjetividad del experimentador, etc.

Desde el momento en que la construcción de conocimiento empírico es un hecho de la ciencia, el cual es elaborado mediante la

aplicación de técnicas estadísticas a datos empíricos directos, surge de modo natural la siguiente pregunta: ¿en qué proporción contribuyen los métodos estadísticos a la naturaleza del objeto empírico estudiado?

La mayoría de los objetos de investigación empírica pueden presentarse como fenómenos de naturaleza estadística. El agregado estadístico que los define es cierto conjunto de individuos elegidos o generados por azar. A un agregado que se presenta de esa forma lo llamamos *objeto estadístico*. Un ejemplo clásico de objeto estadístico es un gas dentro de un recipiente: sus moléculas se mueven siguiendo trayectorias aleatorias. Si queremos indagar la estatura media de los varones adultos de una ciudad, formamos un agregado suficientemente grande de tales varones elegidos al azar, y los tallamos. Es indudable que el objeto formado de este modo es de *naturaleza estadística*.

Se puede argüir que no todos los objetos estudiados experimentalmente son estadísticos por naturaleza. Uno piensa enseguida en la molécula simple, en el hombre individual, en la margarita de los campos, en el pez espada, etc. Se supone que tales objetos poseen una naturaleza totalmente individual y específica, sujeta a las leyes de la dinámica, y que no es susceptible de interpretación estadística.

En el siglo XIX predominaba la idea de que había, en efecto, un límite estricto entre objetos de naturaleza estadística y los regidos por leyes dinámicas de naturaleza determinista. Esto era debido a la imperfección de la tecnología experimental y a la absoluta diferenciación entre leyes dinámicas y leyes estadísticas. Intentaremos mostrar que los llamados objetos individuales pueden presentarse como agregados estadísticos. En efecto, el hombre individual, cuya estatura es tomada como un valor absoluto, cuando es tomado al azar, y es objeto de investigación estadística, puede presentarse como un agregado de estados aleatorios de crecimiento que cambian por el efecto de múltiples causas aleatorias. Luego toda fijación momentánea de la talla de un individuo es una cantidad aleatoria en relación con el promedio de medidas en los diversos estados. Lo mismo puede decirse de las trayectorias de las moléculas aisladas de un gas o de un misil.

Si hemos insistido en el carácter estadístico de los objetos que manejamos en la mayor parte de nuestras investigaciones es por la importancia relevante que, como veremos más tarde, tiene el método estadístico. Los agregados estadísticos que intervienen en una investigación pueden pertenecer a distintos niveles de agregación. Así, los diversos estados en que se halla una oveja que está paciendo constituyen un agregado estadístico. La consideración de un rebaño pastando constituye un agregado estadístico de nivel superior. Un coche en marcha pone en movimiento los medidores de velocidad, temperatura, gasolina, aceite, etc., cuyas medidas dan lugar a diversos agregados estadísticos. Lo mismo ocurre con el minuterio, el segundero, etc., de un reloj puesto en marcha.

Esta reducción de objetos de una naturaleza estadística a objetos de otra naturaleza estadística puede continuarse en regresión indefinida; la elección de una reducción final es cuestión de convenio. En la práctica son las condiciones técnicas del experimento las que ponen límite a la reducción.

1.5. Los científicos y la metodología

Antes de analizar los aspectos *normativos* de la metodología científica vamos a ocuparnos brevemente de los aspectos *descriptivos*, esto es, del *comportamiento efectivo* de los científicos en cuanto a metodología se refiere.

A pesar del papel preponderante de los científicos en nuestra cultura, a los ojos de la mayoría de la gente son un misterio. Conocemos a grandes rasgos lo que hacen los dentistas, cirujanos o abogados, y tenemos alguna idea de los métodos de que se sirven, y los códigos éticos y profesionales que emplean. Los científicos profesionales, son, por el contrario, un libro cerrado para muchos de nosotros. En el sentir de uno de ellos, **Medawar**⁵, premio Nobel de Biología, la imagen popular del científico consta de dos componentes principales.

1. El científico es una persona crítica, racionalista, escéptica, alguien difícil de satisfacer intelectualmente y que cuestiona las creencias recibidas.

⁵ P. B. Medawar, *Logic and Intuition in Scientific Thought* (Londres 1969).

2. Es un aventurero, un viajero por territorios desconocidos, un innovador, un ser especulativo.

La imagen del científico racionalista, escéptico, inconformista con la ciencia recibida, es corriente en la historia del pensamiento científico, y ha sido la palanca principal que ha elevado a categoría superior el conocimiento heredado. La imagen pública del científico aventurero es importante porque impele a la ciencia a seguir hacia adelante. No olvidemos que la ciencia positiva descansa sobre hipótesis que pueden ser sustituidas por otras consideradas más factibles. Así, hemos podido ver cómo la teoría de la relatividad de Newton ha sido reemplazada por la de Einstein, considerada de validez más general.

Esta doble imagen suele asociarse a científicos históricos, como Galileo Galilei o Francis Galton o, más recientemente, a Watson y Crick, los descubridores de la "doble hélice" de la estructura del ADN. Es necesario contemplar esta doble imagen si pretendemos ahondar en el método científico, pues no basta con observar el espíritu crítico que depura y limita, sino también recalar en el lado creativo y especulativo del progreso científico. Debemos, pues, hacernos estas preguntas: ¿Aplican los científicos un método predeterminado en sus trabajos? ¿Hay un método único o son varios?

La cuestión básica que nos planteamos es si existe un método, el método científico, que los científicos aplican en sus trabajos. Para contestar a esta pregunta hemos de hacer unas consideraciones previas. La primera es que la metodología científica, aunque goce de categoría académica, no es popular entre los científicos. Pocos se han preocupado de escribir acerca de ella. Pocos han recibido de ella una instrucción formal. Si un científico ha obtenido un éxito en su investigación suele atribuirlo a la suerte, al tesón en el estudio, al instinto, a la colaboración de sus colegas, a diversas causas, pero nunca al uso o abuso de una metodología formal. El hecho de que los científicos no se gobiernen en sus investigaciones por una metodología formal no significa que no se rijan por algún método. Método es camino, y algún camino se habrá seguido para obtener sus resultados. Lo que es difícil es conocer desde fuera cómo trabajan. De la lectura de sus artículos no suele ser fácil colegir cómo se ha

desarrollado cronológicamente la investigación. *Si quieres conocer algo sobre los métodos que usan los físicos teóricos -escribe Albert Einstein- te aviso que te atengas a este principio: no escuches sus palabras y fija tu atención en sus hechos*⁶.

Un ejemplo famoso de científico que no tiene claras las ideas acerca del camino seguido en su labor investigadora es el de Charles Darwin. En su autobiografía⁷ señala que él *trabajó basado en los verdaderos principios baconianos, y sin ninguna teoría, coleccionando hechos a grande escala*. Pero 20 páginas después se contradice confesando que *nunca se resistiría a formular una hipótesis acerca de cualquier tema, aun antes de haber llevado a cabo un cúmulo de hechos*. Muchos piensan que el caso Darwin no es infrecuente y ocurre porque el científico no suele estar acostumbrado a pensar en torno a los problemas metodológicos. Medawar⁸ describe de modo un poco caricaturesco esta situación.

Pregunta a un hombre de ciencia lo que es el método científico y adoptará una expresión a la vez solemne y de preocupación: solemne porque piensa que debe dar una opinión, y de preocupación porque no sabe cómo ocultar el hecho de que no tiene ninguna opinión que dar. Si se le apremia, probablemente mascullará algo acerca de la inducción y el establecimiento de las leyes de la naturaleza.

Se quiere exculpar a los científicos de la necesidad de conocer la metodología, asumiendo la hipótesis de que el método es entendido por el científico intuitivamente; pero esto presenta dificultades. En primer lugar, está en cómo llega el científico a esta comprensión, y luego, supuesto este conocimiento intuitivo, cabe preguntarse: si tan fácil es intuir el método, ¿por qué hay tanta dificultad en la comunicación científica para obtener una definición consensuada?

⁶ A. Einstein, *On the Method of Theoretical Physics* en *The World as I see It*. trs. Harris (Londres 1935).

⁷ C. Darwin, *The Autobiography of Charles Darwin* (Nueva York 1993).

⁸ Op. cit.



Peter Brian Medawar

2. Ideas generales sobre el método de las ciencias

2.1. Introducción

El predominio de las ciencias, como modo de conocer, ha alcanzado en nuestro tiempo su máxima expresión. Se supone que la ciencia se caracteriza por su método, y porque el camino seguido en el estudio de cualquier objeto ha de conducir a reflejar su realidad.

En el siglo XX se ha llegado a la conclusión de que el método de las ciencias de la naturaleza es único. Eso sirve de "criterio de demarcación", que permite distinguir lo que separa lo metafísico de lo físico. Esto no se da en otros modos de conocimiento como el arte, la religión o la metafísica. Es importante que el investigador científico conozca, pues, su método. El método que vamos a estudiar, de modo especial, es el de las ciencias naturales y, en particular, el de las ciencias empíricas, caracterizadas por la posibilidad que ofrecen de experimentación. Pero actualmente, la sociología del conocimiento propone los métodos sociológicos y antropológicos como métodos científicos, e interpreta el método de las ciencias de la naturaleza a la luz de aquéllos.

Hay dos maneras básicas de método: la manera aristotélica y la galileana. En la primera se contempla la naturaleza; en la segunda, se la interroga.

La *manera aristotélica*, adoptada y desarrollada durante siglos, se caracteriza principalmente por lo siguiente: da primacía al ser natural (objetos de la naturaleza, pero no al hombre); defiende una forma de aproximación teórica basada en la exclusión de toda

manipulación mecánica en la observación de los datos empíricos (ausencia de experimentación); acepta las circunstancias reales en las que se presentan los hechos; se eleva desde los datos hasta los principios más generales mediante inferencias lógicas inductivas; pone la cualidad y la cantidad en pie de igualdad (lo que se traduce en la renuncia a matematizar los seres inanimados); no favorece la aproximación de la física a la técnica.

El *método de Galileo* se inspira en **Arquímedes** y en **Bacon**. Elimina todas las barreras que se levantan contra el empleo de máquinas, aparatos o instrumentos capaces de contribuir a la explicación de los fenómenos de la naturaleza. La simple experiencia u observación cede el paso a la *experimentación*, tanto en lo relativo a las condiciones reales en las que se producen los fenómenos (experimentos reales), como estimulando las condiciones ideales que simplifican dichos fenómenos y, en consecuencia, facilitan su mejor comprensión (experimentos ideales).

Se trata, en este método, de formular hipótesis cuya consistencia ha de ser contrastada empíricamente con el fin de determinar su validez. Se erige la matemática como lenguaje imprescindible al que han de traducirse todos los datos empíricos. Se lleva a cabo, finalmente, un progresivo acercamiento entre la ciencia y la técnica a lo largo de los siglos.

2.2. Deducción, reducción e inducción

Antes de seguir adelante, y con el fin de hacer más comprensible el método científico, vamos a aludir brevemente a algunos conceptos básicos de la lógica clásica. Nos abstendremos de indagar acerca del conocimiento humano, y partiremos de un estado del saber en el que ciertas proposiciones han sido previamente establecidas. Esas proposiciones constituyen los juicios preceptivos que se toman como ciertos, aunque la razón filosófica pueda ponerlos en duda. Lo que se pretende (y ese es el objetivo de la lógica) es pasar de la aserción de ciertas proposiciones, llamadas *premisas*, a otras, llamadas

conclusiones, que se deducen de ellas. A esta operación se la llama *demostración* y al sistema, *argumento*.

Hay dos formas esencialmente distintas de argumentar: por deducción y por reducción.

En la *deducción* se concluye su premisa menor de un enunciado condicional y de su premisa mayor: si A, entonces B; es así que A, luego B.

En la *reducción*, por el contrario, se concluye, de un enunciado condicional y de su premisa menor, su mayor: Si A, entonces B; es así que B, luego A.

La reducción puede ser progresiva y regresiva. En ambas se conoce la premisa menor, pero no la mayor. En la *reducción progresiva* se comienza por la premisa mayor cuyo valor de verdad es desconocido y se procede hacia la premisa menor conocida o comprobable. La reducción progresiva se llama también "verificación".

La *reducción regresiva* comienza en la premisa menor conocida y va hacia la mayor desconocida. La reducción regresiva se llama también "explicación".

Cuando la premisa mayor es una generalización de la premisa menor, la reducción se llama *inducción*. Tal es el concepto tradicional de inducción desde Aristóteles, quien empleó el vocablo "epagoge", que significa "llevar a", para designar el proceso de llevar, por la contemplación de casos particulares, al conocimiento de una verdad general.

En la actualidad no todos están de acuerdo con esta definición restrictiva de la inducción. **Stuart Mill**⁹ observó ya que no es necesario que una inferencia inductiva lleve a una generalización sino que podemos extender la conclusión de un número limitado de miembros desconocidos de una clase al siguiente miembro que aparezca en la serie, por ejemplo. A este procedimiento, de pasar de particulares a

⁹ J. S. Mill, *System of logic* (Londres 1879).

particulares, lo denominó Johnson¹⁰ *educción* y Carnap¹¹ señaló su importancia.

A estas inducciones no demostrativas podemos añadir otras mal llamadas "inducciones impropias". Tenemos, en primer lugar, la *inducción recursiva* o matemática, formulada explícitamente por **Fermat** en el siglo XVII y empleada, de modo sistemático, por **Jacobo Bernouilli**, por lo que se la conoce también con el nombre de "inducción bernouilliana". Se puede expresar así: Si el primer elemento de una sucesión posee una propiedad y la posee también el sucesor de todo elemento de la sucesión que tenga esa propiedad, todos los elementos de la sucesión poseen la propiedad en cuestión. La inducción matemática puede enunciarse más formalmente así: Asociemos a cada número natural n una proposición $P(n)$, que puede ser verdadera o falsa. Si es $P(1)$ verdadera y para cualquier k la verdad de $P(k)$ implica la de $P(k+1)$, es entonces $P(n)$ verdadera para todo n . Este procedimiento es más bien una deducción que una reducción.

Aristóteles ofrece en los *Analíticos primeros* el siguiente ejemplo de argumento inductivo: "El hombre, el caballo y el mulo son longevos; pero el hombre, el caballo y el mulo son todos los animales sin hiel; luego todos los animales sin hiel son longevos". A este tipo de inducción, en la que se enumeran todos los casos que caen bajo una generalización, se la llama "sumativa". A la matemática también se la llama "completa". También este argumento es una especie de deducción.

2.3 Conceptos y características

La palabra "método" viene de dos raíces griegas: "meta" que significa "más allá", y "hodos" que se traduce por "camino". Señala, pues, el camino a seguir para la obtención de conocimiento. El método científico presenta diversidad de definiciones debido a su complejidad. Así, de un modo general, podemos definirle "como un conjunto de

¹⁰ W. E. Johnson, *Logic* (Cambridge 1921-24).

¹¹ R. Carnap, *The continuum of inductive methods* (Chicago 1952).

estrategias que utilizan los científicos para hacer ciencia". Puede definirse también "como conjunto de procedimientos lógicos que sigue la investigación para descubrir las relaciones internas y externas de la realidad natural o social", o "como serie ordenada de procedimientos de que se hace uso en las investigaciones científicas para obtener la extensión de nuestros conocimientos", e incluso, "como conjunto de procesos que el hombre debe emplear en la investigación y demostración de la verdad". Se trata, en suma, de ir desde un punto inicial de una investigación, siguiendo un camino, a otro que se considera final, en la confianza de lograr un conocimiento válido. El método científico está sustentado sobre dos pilares básicos: la reproductibilidad y la falsabilidad. La *reproductibilidad* consiste en la capacidad de poder repetir un experimento en cualquier lugar y por cualquier persona. Este pilar se basa fundamentalmente en la comunicación y en la publicidad de resultados. La *falsabilidad* es la propiedad que tiene toda proposición de ser falsada. Esto significa que pueden diseñarse experimentos que, en el caso de dar resultados distintos de los predichos, refutarían la hipótesis puesta a prueba.

En líneas generales, aparte de lo que es propio de las distintas tipologías, debemos atribuir al método científico las siguientes características:

- 1) Es *racional*, se funda en la razón, esto es, en la lógica.
- 2) Es *claro y preciso*. La claridad y precisión del método científico se pone de manifiesto por la formulación de los problemas sin ninguna ambigüedad y por la creación de lenguajes artificiales provistos de símbolos y signos que se rigen por reglas bien determinadas.
- 3) Es *verificable*, por cuanto puede someterse a la prueba de la experiencia, sin que esto signifique que deban necesariamente llevarse a cabo experimentos.
- 4) Es *explicativo*. Persigue como finalidad la explicación de los hechos en términos de principios y leyes.
- 5) En cualquiera de sus modalidades busca siempre la prosecución de la *verdad fáctica* adaptando las ideas a los hechos, sirviéndose

de la observación y, en su caso, de la experimentación. La *observación* consiste en un examen cuidadoso y crítico de los fenómenos, anotando y analizando los distintos factores y circunstancias que los acompañan. La *experimentación* consiste en la observación del fenómeno bajo condiciones previamente preparadas y cuidadosamente controladas. Sin la experimentación no hubiera llegado la ciencia al nivel en que se encuentra en la actualidad.

6) Analiza cualitativa y cuantitativamente los resultados obtenidos, los compara entre sí y con los datos logrados con anterioridad, dando lugar a la *formulación de leyes* que expresa por fórmulas y palabras.

7) En fases elevadas es *hipotético y teórico*. Se proponen explicaciones tentativas o hipótesis que han de probarse experimentalmente.

2.4. Etapas del método científico general

No hay descripción exacta del llamado método científico, pues son varios los ingredientes que entran en él en combinación variada, según las gentes que lo utilizan, las disciplinas y los tiempos de aplicación.

Una ciencia ideal sigue las siguientes etapas como mínimo en su desarrollo metodológico.

1. Fijación del mundo real de la ciencia a la que se aplica. De este mundo real habrá que juzgar lo que es digno de investigación.

2. Recogida de información. El conocimiento científico se basa en una sistemática observación de los fenómenos que son objeto de investigación. La observación puede ser *directa* o puede ser provocada por la realización de un *experimento* bajo ciertas condiciones. La información así recogida constituye las *observaciones elementales* o *protocolarias*. Estas observaciones se describen en tablas, gráficos, enunciados verbales, etc. La información, para una investigación dada, ha de ser suficiente y precisa, lo cual implica instrumentos adecuados de observación y problemas de medida. El *lenguaje* propio de esta etapa es el común u *observacional*.

3. Clasificación de las observaciones. Consiste en poner de manifiesto las uniformidades comunes de los hechos, a juicio del observador, y a prescindir de los caracteres particulares de cada observación, a fin de hacer una ordenación de esas uniformidades en *categorías*. El científico construye así *tipos*. El tipo está caracterizado por un conjunto más o menos amplio de atributos tenidos como esenciales.

4. Elaboración de **resúmenes de datos** que facilitan el análisis de las posibles interconexiones entre los mismos datos.

5. El razonamiento que sigue a este análisis conduce a generalizaciones empíricas, llamadas también *proposiciones universales sintéticas* que una vez corroboradas constituyen las *leyes empíricas*.

6. Repetición de experimentos con miras a la **refutación o confirmación** de las leyes empíricas.

Hay ciencias que concluyen sus construcciones con las leyes empíricas, como la botánica. Estas leyes restringen la gama de sus posibilidades y, junto con otras proposiciones singulares, ofrecen la posibilidad de hacer previsiones. Son las llamadas *ciencias descriptivas*. La construcción se ciñe a las etapas relacionadas hasta aquí que constituyen el llamado **método descriptivo**. El nivel en el que se mueven es el *empírico*. En el capítulo IV estudiamos con detalle la fase descriptiva del método en su forma estadística.

Para ciencias que superan esta fase descriptiva, que implican conocimiento no empírico, es preciso construir el edificio *teórico-científico* en dos niveles:

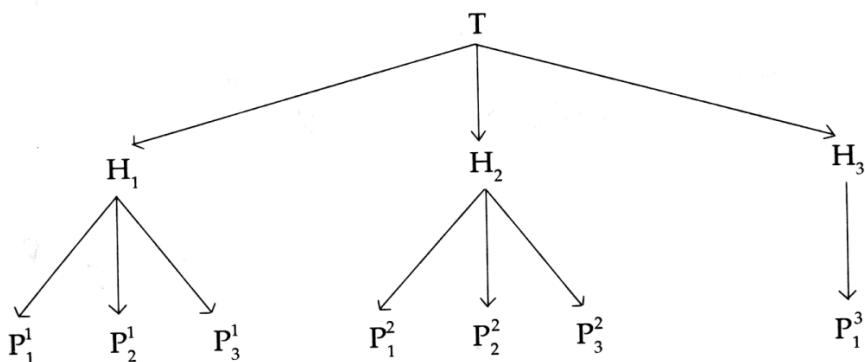
a) conocimiento cuya verdad puede ser confirmada directamente mediante datos de observación y experimentación y cuyo contenido puede ser expresado directamente en términos de objetos y relaciones observables;

b) conocimiento cuya verdad no puede ser confirmada directamente por recurso a la observación y experimentación, y cuyo contenido no tiene contraparte directa en la sensación-experiencia.

Las etapas que enumeramos a continuación señalan la transición de los hechos científicos y relaciones empíricas a **modelos teóricos**

y leyes. En esencia se trata de *descubrir un sistema de objetos teóricos* y las leyes a las que obedecen. El proceso cognoscitivo es una *idealización, abstracción, conjetura o hipótesis*. La culminación de este proceso será la formulación de una **teoría** más o menos estricta del fenómeno estudiado.

A la hora de relacionar los dos niveles, teórico y empírico, podemos considerar dos casos: que *poseamos un sistema teórico pre-establecido*, basado en razonamientos previos, o que *construyamos dicho sistema* en base a los datos empíricos. Estos dos casos corresponden a las dos fases respectivas que estudiamos a continuación: fase deductiva (etapa 7) y fase reductiva (etapa 8).



7. Explicación de unos datos en base a leyes teóricas pre-establecidas El procedimiento utilizado es el **deductivo** y puede ponerse de manifiesto mediante este esquema de Bocheski¹²:

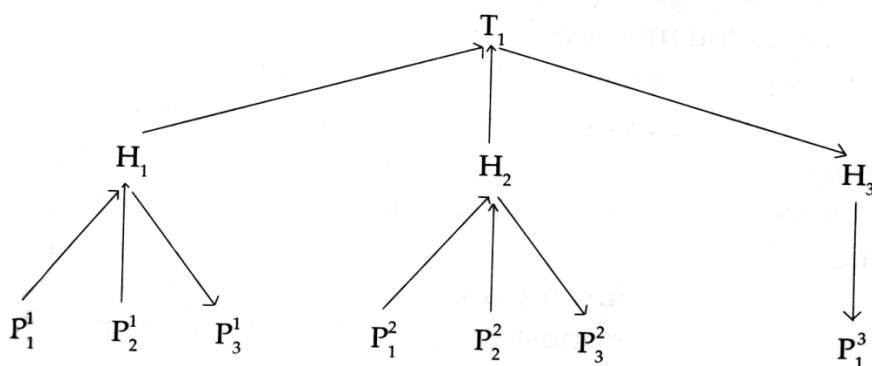
El pensamiento se dirige en el sentido de las flechas: de la teoría T se deducen hipótesis H_i asumiendo quizás supuestos auxiliares y de éstas se sacan conclusiones en forma de proposiciones empíricas que deberán ser contrastadas. Así, T puede representar las leyes de Kepler; H_1 podría ser la hipótesis que formuló el propio Kepler, esto es, que las órbitas de los planetas son circulares; H_2 podría representar

¹² Ibid.

la hipótesis de que las órbitas serían elípticas, como se supuso con posterioridad; H_3 podría explicar la caída de los graves.

En el segundo caso, y entramos ya en la **etapa 8**, el procedimiento utilizado es la *reducción*. Este concluir la premisa mayor desde la *consecuencia* de un condicional es una regla sospechosa y un procedimiento no válido, según las leyes de la lógica. Con todo, es una regla usada frecuentemente en la ciencia.

En la etapa que comentamos el movimiento del pensamiento va de las proposiciones empíricas P^1_1 y P^1_2 a H_1 (*reducción regresiva*, formación de hipótesis); después va de H_1 a P^1_3 (*contrastación*); luego se repite el proceso yendo hacia H_2 , y así sucesivamente.



La teoría T_1 se obtiene regresivamente de H_1 y H_2 (con sus correspondientes teorías auxiliares), y de H_3 se deduce P^3_1 que es la *proposición empírica* que se ha de verificar.

8. Esta etapa suele llamarse **hipotético-deductiva**, pues se alude a dos direcciones: es *hipotética*, por cuanto se construyen hipótesis explicativas de unos hechos observados; es *deductiva*, por cuanto se deducen de las hipótesis unos hechos, premisas menores, verificables.

9. A veces se usan **teorías conceptuales** o matemáticas que contienen *términos indefinidos* (método axiomático) con *reglas de interpretación* que dan a las teorías verdadero significado operativo.

La teoría cuántica, en cualquiera de sus formulaciones rigurosas, y muchas ramas de la física, como la mecánica, constituyen ejemplos de construcciones axiomáticas, que permiten hacer previsiones; pero estas construcciones difieren de las de la geometría, por ejemplo, en que poseen distinto concepto de verdad (hay diversidad de axiomáticas cuyos axiomas se inspiran en el mundo real o en espacios abstractos).

Estas construcciones no representan la realidad; son instrumentos que describen aproximaciones de la verdad en las deducciones que realizan. Se construyen sobre la base de un conjunto de conceptos primitivos formulados en forma de axiomas. Si el sistema está construido coherentemente, la ciencia siempre será cierta. Podrán surgir por este método cuerpos doctrinarios diferentes, y hasta contradictorios entre sí (caso de las geometrías euclídeas y no euclídeas), con el mismo nombre e igualmente ciertos desde el punto de vista de la lógica. El sistema axiomático da un apoyo vigorosísimo a la tarea de individualizar aquellas uniformidades generales, ya sea como proposiciones universales sintéticas o leyes empíricas, ya sea como reglas de procedimiento o leyes teóricas. Una teoría sencilla es preferida, a veces, a otra compleja, si ambas explican los mismos hechos y con la misma extensión. El ideal es, con frecuencia, obtener una teoría no demasiado complicada y que explique un campo total experimental, aunque la teoría demande a su vez explicación.

10. Verificación o contraste de hipótesis o teorías. La verificación de *proposiciones universales* es imposible. La verificación de la ley de atracción de las masas exigiría comprobar que se cumple para todos los pares de masas posibles (*verificación completa*), y esto no es posible. Entonces es preciso acudir a la *contrastación estadística*. La contrastación exige repetición de experimentos u obtención de nuevas observaciones.

11. Comunicación de resultados. Una vez obtenidos unos resultados, debidamente contrastados, es preciso *comunicarlos* a la comunidad científica o, en todo caso, a los usuarios y a cuantos estén

interesados en la investigación. Esta etapa supone exposición clara y concisa de las conclusiones obtenidas y publicación de los resultados y del método seguido en su obtención.

2.5. Debate en torno al método científico

Durante muchos años el debate en torno al método científico fue dominado por la creencia de que el razonamiento científico es puramente inductivo, esto es, conlleva argumentar de lo particular a lo general, y así inferir una ley a partir de instancias particulares.

El conocimiento verdadero se obtendría amasando grandes cantidades de datos y hechos, de modo que surja de ellos la verdad en forma, quizás, de leyes universales. **Karl Pearson**¹³ expresó así su punto de vista:

La unidad de toda ciencia reside en su método, no en su contenido. El hombre que clasifica hechos de una clase cualquiera, que ve su relación mutua y describe sus consecuencias, está aplicando el método científico y es un hombre de ciencia.

Un poco después añade:

El método científico está caracterizado por lo siguiente: a) cuidadosa y precisa clasificación de hechos y observaciones, y su correlación e ilación; b) descubrimiento de leyes científicas por medio de la imaginación creativa; c) autocrítica, y la piedra de toque final de la igual validez para todas las mentes igualmente constituidas.

Con los años el inductivismo ha decaído. A pesar de su general aceptación en otros tiempos, las opiniones de los críticos han prevalecido y, en su forma original baconiana, es raramente defendido en la actualidad. Existe, desde el punto de vista filosófico, el problema suscitado por **Hume**, según el cual todo razonamiento basado en la inducción no puede dar lugar a un proceso lógicamente válido. Este problema es ampliamente discutido en nuestro libro *Filosofía de la probabilidad*.¹⁴ El que hasta la fecha haya salido el sol todas las mañanas no es garantía segura de que haya de ocurrir siempre.

¹³ K. Pearson, *The grammar of science*, (Londres 1911).

¹⁴ S. Gutiérrez Cabria, *Filosofía de la probabilidad*, Tirant lo Blanch (Valencia 1992).

Popper escribe en *Conocimiento objetivo*¹⁵:

Creo que la teoría siempre va delante -al menos una teoría o expectativa rudimentaria-; siempre precede a las observaciones cuyo papel fundamental, así como el de las contrastaciones experimentales, es mostrar que algunas de nuestras teorías son falsas, estimulándonos de ese modo a construir otras mejores.

Por consiguiente, afirmo que no partimos de observaciones, sino siempre de problemas -sea de problemas prácticos o de una teoría que se encuentra en dificultades-. Una vez que abordamos un problema podemos empezar a trabajar sobre él, lo cual se puede hacer en dos pasos: podemos proceder tratando, en primer lugar, de tramar o conjeturar una solución al problema, para luego intentar criticar nuestra suposición que, normalmente, será más endeble. A veces nuestra suposición o conjetura podrá mantenerse durante algún tiempo frente a nuestra crítica y nuestras contrastaciones experimentales. Mas, por regla general, pronto encontraremos que nuestras conjeturas se pueden refutar, que no resuelven nuestro problema o lo resuelven en parte. Además, nos encontramos con que incluso las mejores soluciones -las que son capaces de resistir las críticas más rigurosas de las inteligencias más brillantes o ingeniosas- en seguida presentan dificultades y problemas. Por tanto, podemos decir que el aumento del conocimiento va de viejos a nuevos problemas mediante conjeturas y refutaciones [...] Afirmo que poseemos un determinado grado de conocimiento innato del cual partir, aunque sea poco fiable. Este conocimiento innato, estas expectativas innatas crearán nuestros primeros problemas, si se ven defraudadas. Podemos decir, por tanto, que el ulterior desarrollo del conocimiento consistirá en corregir y modificar el conocimiento previo.

Por tanto, invierto los términos de quienes piensan que la observación debe preceder a las expectativas y problemas”.

Lo que aquí afirma Popper, de modo contundente, es que “el aumento del conocimiento va de viejos a nuevos problemas por medio

¹⁵ K. Popper, *Conocimiento objetivo* (Madrid 1982).

de conjeturas y refutaciones". Lo que condena es el método inductivo, y lo que defiende es el método hipotético-deductivo.

Esta crítica al inductivismo no significa que la inducción esté muerta o que no desempeñe ningún papel en la investigación científica. Por el contrario, hay muchas situaciones en la ciencia moderna en las que el razonamiento inductivo es aplicable y es usado. Lo que queremos dejar claro es que, en épocas pasadas, inductivismo era sinónimo de método científico y hoy no se considera así.

Como subyace en las palabras anteriores de Popper, y será explicado con detalle más tarde, se ha dado al método científico la interpretación de un proceso **hipotético-deductivo**. Sus principales propulsores han sido el propio Popper y Medawar, pero, como ocurre a menudo en ciencia y filosofía, sus orígenes hay que buscarlos en el pasado. Ecos del método hipotético-deductivo se hallan en Hooke, contemporáneo de Newton, en Kant y en el biólogo francés del siglo XIX Claude Bernard. Más recientemente, sus defensores invocan las figuras del economista Stanley y el filósofo C. S. Peirce. Aunque este método es ampliamente aceptado como una descripción del método científico, ha sido sometido a buen número de críticas.



Hermann Conring

3. El método estadístico

3.1. Formulación del método estadístico

En el informe de M. G. Kendall a la "Royal Statistical Society" titulado *On the future of Statistics. A Second Look*¹⁶ leemos estas palabras:

Ahora es más fácil sustentar -y soy uno de los que proponen esta tesis- que la estadística, en su sentido más amplio, es la matriz de toda ciencia experimental y, por consiguiente, una rama del método científico, si no el método científico por excelencia, y que supera la aplicación del método científico en diversos campos de aplicación.

Más que rama del método científico, nosotros vemos en el método estadístico una de las varias interpretaciones, la preferida hoy por la mayor parte de los científicos. Todas las etapas del método científico, enumeradas con anterioridad, tienen validez en el método estadístico, potenciadas con especiales técnicas que lo hacen especialmente útil. Entre esas técnicas especiales cabe mencionar las que abordan los problemas de clasificación y exploración de datos, análisis de dependencia e interdependencia, elaboraciones heurísticas susceptibles de programación por ordenador, empleo de *estadísticos* que disminuyen la subjetividad y aleatoriedad de las observaciones, etc.

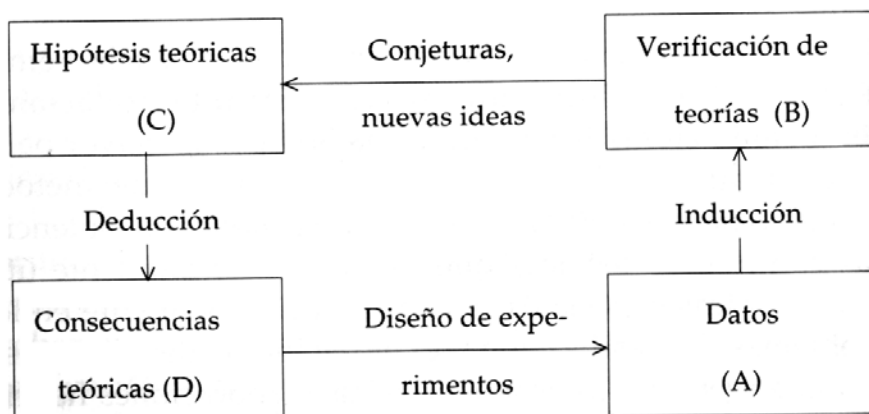
Lo que caracteriza a la estadística es que, cualquiera que sea el origen de los datos que maneja, utiliza los mismos métodos y conceptos. Esto es debido a su carácter instrumental al servicio de las demás disciplinas.

¹⁶ M. G. Kendall, *On the future of statistics. A second look*, (Londres 1968).

Por otra parte, áreas especiales de aplicación usan técnicas especializadas y adaptadas a necesidades particulares. La lista de estas áreas es larguísima.

Otro hecho central a todo pensamiento estadístico es el que un conjunto de datos recogidos es uno de los muchos posibles que pueden obtenerse bajo circunstancias dadas. Esto abre camino a la *repetición de experimentos* y a la *variación* en los resultados.

El método hipotético-deductivo admite una formulación especial dentro de la estadística por la que ésta ofrece a la labor del científico. El siguiente esquema, debido a **Rao**¹⁷, diseña un círculo cerrado donde se muestran ambas.



La explicación que da Popper¹⁸ del método científico es ésta: Presentada a título provisional una idea nueva (C), aun no justificada en absoluto -sea una anticipación, una hipótesis, un sistema teórico o lo que sea- se extraen conclusiones (D) de ella por medio de una deducción lógica; estas conclusiones teóricas se comparan entre sí y con otros resultados pertinentes. Y, finalmente, viene el contraste por medio de la aplicación empírica de las conclusiones que pueden deducirse de ella. Lo que se pretende con este contraste es descubrir hasta qué punto satisfarán las nuevas consecuencias de la teoría -se

¹⁷ C. R. Rao, *Statistics and truth*, (Nueva Delhi 1989).

¹⁸ K. Popper, *La lógica de la investigación científica* (Madrid 1967).

cual fuere la novedad de sus asertos- los requerimientos de la práctica (A), ya provengan éstos de experimentos puramente científicos o de aplicaciones tecnológicas prácticas. Si las conclusiones singulares resultan ser aceptables o verificadas (B), la teoría a que nos referimos ha pasado con éxito las contrastaciones (por esta vez): no hemos encontrado razones para desecharla. Pero si la decisión es negativa, o sea, si las conclusiones han sido *falsadas*, esta falsación revela que la teoría, de la que se han deducido lógicamente, es también falsada. Durante el tiempo en que una teoría resiste contrastaciones exigentes y minuciosas, y en que no la deja anticuada otra teoría en la evolución del progreso científico, podemos decir que ha demostrado su temple o que está corroborada por la experiencia.

Se observa en el esquema anterior un doble proceso lógico: un razonamiento inductivo y otro deductivo. De ellos nos ocuparemos más tarde. Hay además dos tipos de labores claramente diferenciadas: los caminos BC y CD pertenecen al campo de investigación científica y al papel creador jugado por el científico; los caminos DA y AB caen bajo el dominio del estadístico.

3.2. Aportación de la estadística al conocimiento científico

El proceso de la investigación empírica en la que se aplica la estadística consta de los siguientes elementos constitutivos:

a) El *objeto* de la investigación en forma de un agregado de individuos. De él se toma una muestra elegida por un procedimiento en el que interviene el azar.

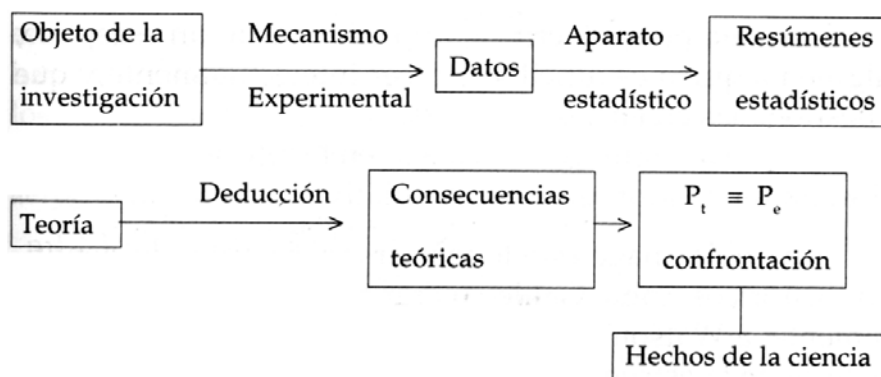
b) El *mecanismo* experimental, que hace posible obtener los estados de los individuos de la muestra.

c) Un conjunto de *datos*, que fija los resultados individuales fruto de la interacción entre los individuos de la muestra y el mecanismo experimental en términos y proposiciones, expresados en el lenguaje de la propia ciencia.

d) El *aparato estadístico*, que consta de expresiones analíticas, de fórmulas estadísticas o, también, de modelos estadísticos dados por diversos mecanismos técnicos.

e) El proceso de *confrontación* de la probabilidad estadística (la que corresponde a la proposición experimental) con la que se deduce de alguna teoría explicativa de los datos (la que corresponde al modelo utilizado).

El esquema del proceso es el que figura en el gráfico siguiente:



En la parte superior del esquema figuran los elementos *empíricos* del proceso, elementos a), b), c), y d) reseñados antes. La parte inferior corresponde a la *deducción lógica*: se parte de un elemento *conceptual* (conjetura, hipótesis, teoría) del que se deducen consecuencias de naturaleza teórica, las cuales han de ser confrontadas con las proposiciones empíricas.

Así, el objeto de la investigación puede ser el estudio *muestral* de la estatura de una población humana. El mecanismo experimental puede ser el instrumento para talar. Los datos serían las "tallas". Los resúmenes estadísticos serían las tablas elaboradas con las tallas, o las medias, o las varianzas, toda clase de *estadísticos* obtenidos a partir de las tallas. P_e sería una proposición empírica sacada de los datos. La *teoría* podría ser cualquier *modelo* de supervivencia humana en el que figure la estatura. De este modelo se extraerían consecuencias teóricas: medias, varianzas, valores esperados en general de esta-

turas. P_t sería una proposición teórica deducida de las conclusiones teóricas. Al final, habrá que confrontar P_e con P_t , y el resultado de esta confrontación dará origen a *hechos de la ciencia*. P_e puede ser, por ejemplo, la media muestral y P_t la media poblacional.

3.3. Descripción, explicación y predicción

El método estadístico comprende tres fases fundamentales: la descripción, la explicación y la predicción. La base para distinguir entre estas fases es la naturaleza, origen y magnitud de la *evidencia* que se posee. Esta evidencia puede provenir de los factores ambientales o de los datos. La descripción se apoya fundamentalmente en la información, en los datos. La explicación y la predicción presuponen evidencia *a priori* de las observaciones, y son lógicamente independientes del "explanandum", esto es, de la explicación. La predicción sigue naturalmente a la explicación.

En base a sus propiedades físicas se describen huellas de pies humanos. Se deduce lógicamente que fueron producidas por seres humanos que pasaron por allí: es la explicación del origen de las huellas, debidas a algún humano andando de determinada manera, producidas por pies humanos. Esta explicación conduce a la deducción de la presencia de seres humanos por aquel lugar. Este proceso de descripción, explicación y predicción es el que llevó a cabo Robinson Crusoe al advertir ciertas pisadas sobre la playa.

La distinción entre explicación y predicción ha sido objeto de mucho estudio en la reciente literatura; no ha ocurrido lo propio para establecer la distinción entre descripción y explicación o entre descripción y predicción. Aunque la distinción entre estos conceptos no aparece siempre clara, nos serviremos de ellos para englobar en tres fases las etapas del método estadístico.

La descripción, explicación y predicción estadísticas ocupan los tres próximos capítulos. Nuestra pretensión es indagar cómo estas tres visiones de la estadística interfieren en la descripción, explicación y predicción científicas, como parte constitutiva de la metodología científica y, en consecuencia, de la filosofía de la ciencia.

3.4. La investigación y el método científico

3.4.1. Ideas generales

La investigación científica es un proceso que, mediante la aplicación del método científico, procura obtener información relevante y fidedigna, con el fin de extender, verificar y corregir el conocimiento. El Diccionario Internacional Webster la define así: *Un procedimiento reflexivo, sistemático, controlado, crítico, que permite describir nuevos hechos o datos, relaciones o leyes, en cualquier campo del conocimiento humano.*

En estas definiciones se destaca el carácter crítico, reflexivo y sistemático del proceso como corresponde al método científico que le sirve de base. La investigación científica ayuda a mejorar toda clase de estudios porque contacta con la realidad, al mismo tiempo que sirve de estímulo a la actividad intelectual creadora. Desarrolla, además, la curiosidad por resolver problemas nuevos, y fomenta el espíritu crítico en las lecturas que se hacen.

Toda investigación científica consta fundamentalmente de estos elementos. Hay un sujeto, un objeto, unos medios y un fin. El sujeto es el que desarrolla la actividad, el investigador. El objeto es lo que se indaga, la materia de investigación, el tema. Los medios son los métodos y técnicas adecuados para llevar a cabo la investigación. El fin es aquello que se persigue al investigar, los propósitos de búsqueda, esto es, la solución del problema.

En toda investigación científica se observan estos cometidos fundamentales. Esencialmente, es un aporte para el descubrimiento de nuevos principios generales de la ciencia. Para cumplir este fin, acude a las fuentes primarias donde descubre nuevos conceptos, de los que lleva a cabo una exploración organizada, sistemática y exacta. Además, con lógica y objetividad, se preocupa de obtener resultados cuantitativos de datos manejados con anterioridad. Al final del trabajo, ofrece un informe del proceso seguido con los resultados obtenidos.

Entre las actividades más corrientes de una investigación están las siguientes: medir, cuantificar, fenómenos; comparar los resultados obtenidos con otros ya conocidos; interpretar lo que se deduce de la investigación con los conocimientos actuales, teniendo en cuenta las variables que pueden haber influido en el resultado. Los aspectos que deben tenerse en cuenta son de índole social, ética, ambiental y económica. Como norma general, una investigación persigue siempre un propósito señalado, está en posesión de unos medios, busca un determinado nivel y se basa en una estrategia particular o combinada.

La sistemática de la investigación científica es la del método científico. En consecuencia, ha de ser organizada: todos los miembros del equipo han de conocer perfectamente el cometido que han de cumplir a lo largo de todo el estudio aplicando las definiciones y criterios de todos los participantes y actuando de modo idéntico ante cualquier duda que pueda surgir. Ha de ser objetiva: las conclusiones que se deriven no han de basarse en impresiones sino en hechos observados y medidos, interpretados sin ningún prejuicio.

El nacimiento de un proyecto de investigación se nutre de fuentes diversas: experiencias particulares, lecturas de escritos (libros, artículos, tesinas o tesis doctorales, etc.), conversaciones con otras personas, observaciones de hechos, creencias, presentimientos, etc. De alguna de estas fuentes surge una idea y el deseo de llevarla a cabo.

Antes de embarcarse en el pleno desarrollo de esta idea es aconsejable llevar a cabo una *investigación exploratoria*, una especie de *investigación piloto* donde se afinan las armas que han de utilizarse en la investigación definitiva. En ella se ponen a prueba los aspectos fundamentales de la investigación que se tiene en la mente, y se buscan los procedimientos que se consideran más adecuados para una investigación posterior. Este estudio piloto es muy útil porque, al contar con sus resultados, se simplifica la apertura de nuevas líneas de investigación, y permite su consecuente comprobación.

3.4.2. Etapas de una investigación científica

Toda investigación científica recorre un ciclo de etapas a la hora de aplicar los métodos científicos. El conocimiento científico avanza en medio de una sucesión ininterrumpida de *problemas* que surgen a partir de los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, y que se van resolviendo combinando razonamientos y experimentaciones.

Por problema entendemos cualquier dificultad que no se pueda resolver de modo automático, esto es, con la sola acción de nuestros reflejos instintivos y condicionados, o mediante el recuerdo de lo que hemos aprendido anteriormente. Además de estos problemas no buscados, hay otros que creamos nosotros mismos, como por ejemplo los que surgen en la explicación de nuevos descubrimientos, en la demostración de teoremas, en la verificación de hipótesis, en la toma de decisiones o en todos los estudios en los que, de algún modo, hay transformación de la naturaleza.

Todo problema implica una *pregunta* que constituirá el meollo de la investigación y la base para construir el marco teórico. Esta pregunta ha de ser expresada de modo concreto y preciso de tal suerte que pueda investigarse por procedimientos científicos. Es importante el descubrimiento de la pregunta relevante, sin que haya facetas desconocidas en el problema.

Rebasa la finalidad de este trabajo señalar las particularidades que puede presentar una investigación científica, como son la elección y delimitación del tema, el planteamiento y formulación sistematizada del problema, la fijación de los objetivos y marco teórico, etc. Sí diremos algo, por su especial implicación en el método científico, de la formulación de hipótesis.

Las hipótesis orientan y sirven de guía al investigador. Surgen al estudiar el planteamiento del problema y deben tener estas características: deben apoyarse en conocimientos bien aquilatados y estar

relacionadas con el marco teórico; deben tener el mismo alcance que el problema teórico y estar bien estructuradas; deben establecerse en relación con fenómenos susceptibles de ser sometidos a pruebas.

Podemos definir una hipótesis científica como *la explicación de un supuesto que está implícito en ciertos hechos*. También podría definirse como *suposición que permite establecer relaciones entre los hechos*. El nexo entre teoría e investigación es la hipótesis; es la que lleva a descubrir nuevos hechos. La hipótesis puede estar basada en simples conjeturas, en estudios previos, etc. La hipótesis sirve de guía para obtener datos en función de los interrogantes del problema. Es muy importante saber hacer abstracción de la realidad, simplificar un conjunto de datos resumiéndolos bajo un mismo nombre.

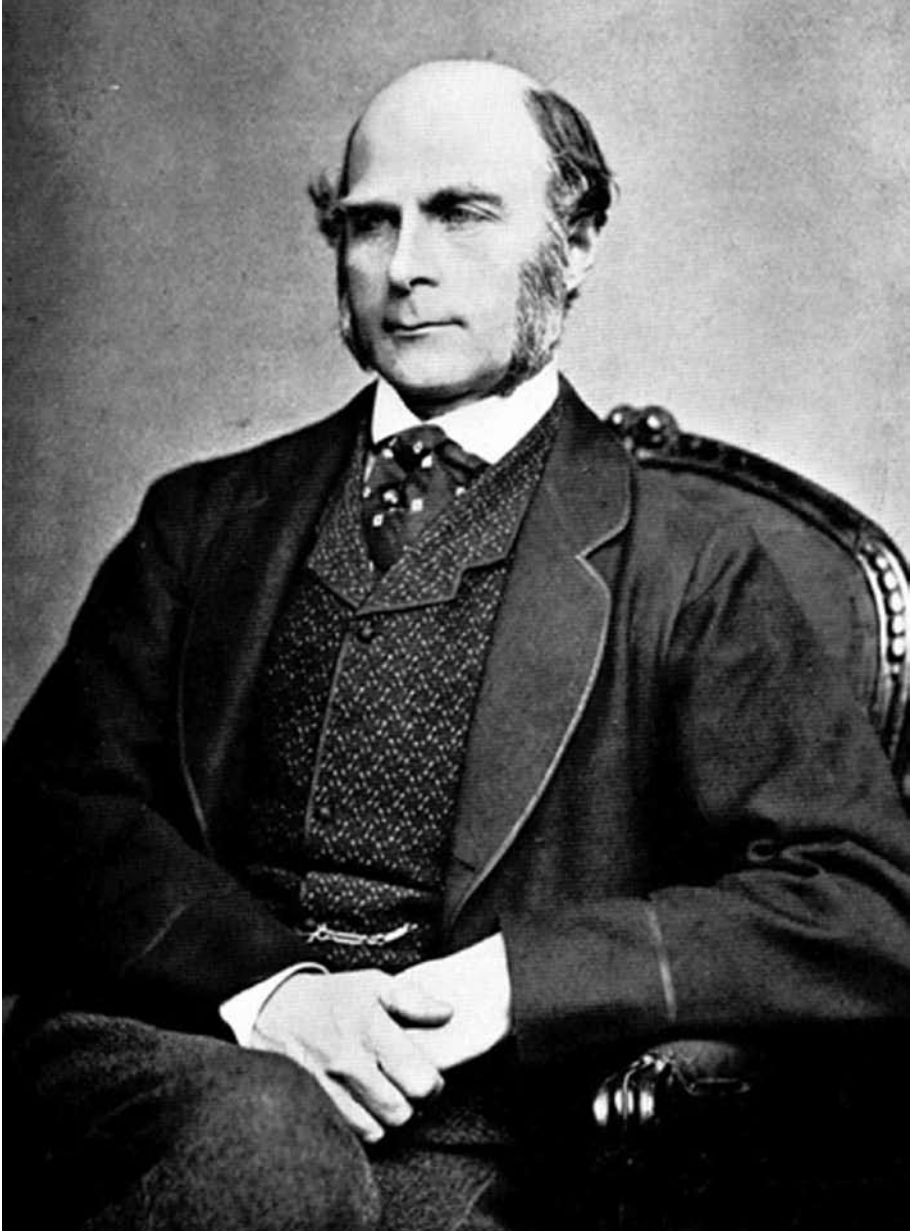
Formuladas las hipótesis es preciso probarlas. Para ello, el científico debe recoger datos que o bien las confirman o bien las rechazan. Estos datos deberán someterse a un análisis estadístico a fin de descartar los que no sean imputados al azar o a un factor determinado. Se asigna un nivel de probabilidad a los datos obtenidos para poder decidir si lo que vemos tiene su origen en la causa que sospechamos o se debe a algún otro factor no considerado. Una exposición sencilla del contraste de hipótesis puede verse en nuestra *Bioestadística*¹⁹ o en *Estadística para las ciencias jurídicas*²⁰.

Los resultados de una investigación se expresan por medio de índices aritméticos como frecuencias, porcentajes, tasas, índices de correlación, etc. Y se presentan por medio de tablas o gráficos. Estas representaciones permiten tener una visión rápida de las conclusiones.

Una propiedad de las ciencias empíricas es que su construcción admite modificaciones. Una hipótesis, formulada con anterioridad a una investigación, puede y debe ser modificada si los resultados obtenidos le son adversos. En este sentido la confirmación o refutación de hipótesis es una contribución a la ciencia misma.

¹⁹ S. Gutiérrez Cabria, *Bioestadística* (Madrid 1978).

²⁰ S. Gutiérrez Cabria, *Estadística para las ciencias jurídicas* (Valencia 1992).



Francis Galton

4. La descripción estadística

4.1 Introducción

Dentro de la descripción estadística estudiaremos las siguientes etapas del método estadístico: delimitación del problema de investigación estadística, recogida de datos, clasificación y reducción de datos, análisis internos de los datos (sin llegar a conclusiones que excedan los propios datos), y repetición de experimentos con miras a las confirmaciones o refutaciones de estas conclusiones que acaban en leyes empíricas.

La descripción estadística que aquí se contempla, coincide con la clásica *estadística descriptiva*.

Como ya se dijo al hablar del método científico en general, y se volvió a insistir al describir las etapas de la investigación científica, en toda investigación estadística hay una fase previa que consiste en definir con claridad el problema a investigar en términos de la información que se necesita. Esta etapa es fundamental para el desarrollo de las siguientes. Si el investigador tiene experiencia estadística pondrá énfasis en ella a fin de llevar a cabo un *diseño* eficiente. ¿En qué estoy interesado? ¿Cómo debo formular la cuestión si quiero obtener respuestas correctas con los datos que puedo obtener de las fuentes disponibles? La definición del problema en términos estadísticos es la máxima aportación que puede hacer un estadístico a un equipo de investigación. Como también indicamos ya, es importante que éste conozca los fundamentos de la materia

de que es objeto la investigación a fin de asegurar que el estudio se ajuste al problema real.

Otro tipo de problemas que condiciona el diseño estadístico es el relacionado con los medios e que se dispone. Se pueden elegir técnicas mejores y peores; las hay más caras y más baratas. La bondad del estudio depende en gran manera de las técnicas empleadas y éstas de los medios disponibles.

Antes de iniciar el estudio propiamente dicho habrá que redactar un informe en el que figuren los objetivos fijados, presupuesto, etc.

4.2. La recogida de datos

La recogida de datos comprende dos fases: el diseño de experimentos y la medida de observaciones u obtención de datos. Haremos antes una digresión acerca de los términos información, observación y dato.

4.2.1. La información estadística. Datos y observaciones

La información es el resultado de la interacción del hombre y la naturaleza. Es la toma de conocimiento de lo que ocurre en nuestro alrededor. Informarse es enterarse de algo, averiguar un suceso.

El concepto de *observación directa* varía con las escuelas: depende del modo de introducir los resultados de la sensación-experiencia. Los neopositivistas del **Círculo de Viena** parten de observaciones simples, cuyas descripciones lógicas llamaron *proposiciones protocolarias*. Las consideraron irreducibles, como expresión de los resultados de la experiencia, dados directamente. Son fijaciones de situaciones concretas empíricas y, en consecuencia, tanto las observaciones simples como sus descripciones lógicas, incluyen información del objeto en el momento en que se realizan. Son, pues, hechos fortuitos que dependen de ese momento. Y esto es cierto tanto si la observación y la descripción se hacen por una persona humana, afectada por su emotividad y *ecuación personal*, o por un artificio técnico (como una célula fotoeléctrica) indiferente al resultado. Así, la trayectoria

real de un ingenio que se desplaza no coincidirá, en general, con la trayectoria ideal, debido a las fluctuaciones producidas por distintas fuerzas, como son resistencia al aire, electromagnetismo, situaciones topográficas, etc. La calificación dada por los neopositivistas a las observaciones simples de *indivisibles* y *absolutas* ha sido negada por Anoxin¹.

Supongamos que un peatón tiene que atravesar una calle en una gran ciudad. Mira rápidamente a los coches, a los otros peatones, a las luces etc., y toma una decisión instantánea, basada en la estimación de la situación ante estas alternativas: pasar o esperar. La ojeada del peatón puede considerarse como una observación simple en una cierta situación simple, según la filosofía de los neopositivistas.

Para **Anoxin** y su escuela, estas observaciones son el resultado de una corriente de impulsos discretos, moviéndose desde los receptores, a través de las neuronas aferentes, a las correspondientes células del cerebro que llevan a cabo una síntesis estadística cuya elaboración tiene lugar con enorme rapidez. Esta colosal rapidez de recepción y elaboración de la información a partir de los impulsos es, según Anoxin, una condición básica de supervivencia de los organismos vivos. El sentido común no está en situación de apreciar que la unidad externa del resultado de observación oculta una *sintética*, es decir, estadística, elaboración llevada a cabo por el sistema nervioso. El hecho de que esta elaboración ocurra sin la ayuda de ninguna fórmula analítica y no sea consciente, no es argumento en contra del *carácter estadístico* de la llamada observación simple.

Dato (del latín "datum", lo que se da) es lo que precede y se necesita para llegar al conocimiento exacto de una cosa. Este sentido etimológico de la palabra alude claramente a un tipo de información con caracteres y fines específicos de cara a una indagación concreta. Estos caracteres se han ido orientando paulatinamente de la mano de la técnica hacia la *experimentación científica* y han adquirido especificidad con la estadística.

¹ P. K. Anoxin, *Method of logical analysis of the principal problems of the conditioned reflex*, (Moscú 1962).

Todo dato simple es la fijación de un contacto simple entre el objeto y la correspondiente situación experimental. Tal contacto se llama *situación empírica*. Como se ve, a todo dato va asociado el experimento diseñado para la obtención de conocimiento empírico, en algún estado del objeto en estudio. Este experimento presupone la existencia de un número significativo de situaciones empíricas necesarias para la elaboración estadística de los datos. La tarea primordial en cada dato simple consiste en fijar los resultados de la interacción entre el estado aleatorio del objeto y la estructura experimental aleatoria para obtener algún conocimiento del primero.

Las medidas de estaturas de personas, de la longitud y anchura de las hojas de una planta, del peso de una carga, la cantidad desintegrada por minuto de un cuerpo radiactivo, las lecturas de un termómetro o barómetro, las puntuaciones de un estudiante en un test de aptitud o de inteligencia, los recuentos de una población, etc., son ejemplos típicos de datos, reflejos claros de situaciones empíricas en las que es fácil descubrir los objetos de estudio y el sistema o *aparato de medida* que constituye la *estructura experimental*.

El dato se expresa por medio de números, símbolos, palabras u otras representaciones gráficas o analíticas. El dato suele ir ligado a la experimentación, que es por tanto *información controlada*, a diferencia de la simple observación. En astronomía, por ejemplo, sólo es posible la observación. Lo propio ocurre en gran cantidad de disciplinas donde no es siempre posible la experimentación.

La información más interesante en estadística es la que procede de los datos experimentales (u observacionales). Puede obtenerse por vía *muestral* o mediante investigaciones exhaustivas de la población, como los *censos*. Pero existen otras fuentes de información.

Una empresa que se dedica a construir aviones recibe un día una oferta de un tipo de material por parte de uno de sus abastecedores que -dice- es el más adecuado por sus cualidades de ligereza, resistencia, etc., para el nuevo modelo que se proyecta. Los técnicos de este modelo experimentan el material que se ofrece (*datos*

maestras), pero tienen también en cuenta los datos suministrados por el proveedor, persona que conoce los resultados del material que ofrece en otros proyectos de otras firmas (*experiencias pasadas*). Por otra parte, el equipo económico, de acuerdo con el equipo técnico, hace valoraciones de las consecuencias que se desprenderían de la adopción del nuevo material: perjuicios causados -si no se cumplen las especificaciones exigidas por el mercado-, diferencias en los costes, comercialización, etc. (*información sobre las consecuencias potenciales*).

Vemos en este ejemplo que la información que se precisa para resolver un problema estadístico puede abarcar información de tres categorías distintas: información debida a datos, información debida a experiencia anterior, y la debida a consecuencias potenciales que puede traer consigo una u otra acción.

La información que conllevan las posibles consecuencias está inmersa en el problema de la *valoración* de esas consecuencias, el cual es vital, ya que es determinante a la hora de tomar acciones alternativas. Esta valoración debe ser *cuantificada* de algún modo a fin de poder comparar los resultados de los distintos cursos de acción. La valoración de las consecuencias y su formal cuantificación es objeto de la *teoría de la utilidad*.

Lo mismo que los datos muestrales, la valoración de las consecuencias puede ser *objetiva*: los costes de manufacturas debidos a procesos distintos pueden ser valorados en moneda de cuenta. Pero puede suceder que las consecuencias que se desprendan de la toma de acciones distintas no sean susceptibles de una valoración objetiva. ¿Cómo valorar objetivamente, por ejemplo, los resultados de elegir entre el cumplimiento de la ley y el cohecho? ¿Cómo ser objetivo a la hora de elegir un hombre como esposa a Juana o a María? En la esfera de las actividades humanas es a menudo difícil ser objetivo. La valoración de consecuencias implica evaluar *juicios subjetivos* (personales), acudir a los instrumentos de la teoría de la utilidad.

Aun en situaciones aparentemente objetivas no es fácil eludir todo factor personal. En la elección de uno u otro material, aparte de componentes objetivos perfectamente comparables de precio, calidad, etc., siempre intervendrán el gusto del decisor, las modas en el consumo, la presión social, etc. Todos sabemos lo que pesan, por encima de todas las características técnicas y el precio, las preferencias y gustos en el momento de elegir un nuevo modelo de automóvil.

4.2.2. Diseño del experimento

Diariamente cada uno de nosotros lleva a cabo alguna observación con *finalidad estadística*. La parte más elemental de la estadística hace su aparición en cuanto se realiza mentalmente la evaluación de una investigación cualquiera. Cuando uno se pesa, automáticamente compara el peso obtenido con el *promedio* de pesadas anteriores y considera si este peso se *desvía significativamente* del comúnmente observado.

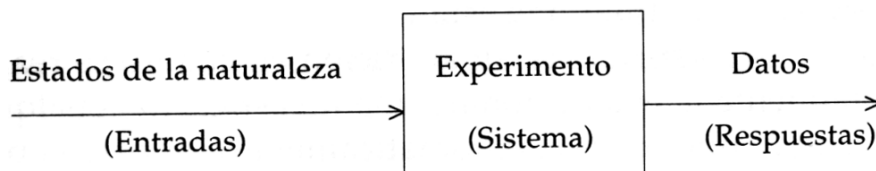
Estos resultados sencillos se obtienen con facilidad; pero cuando se emprende una investigación en serio es preciso acudir a las técnicas e instrumentos estadísticos.

La primera etapa que ha de plantearse el estadístico es la *planificación* de la recogida de datos: cuántos y de qué clase han de obtenerse para contestar a las preguntas del problema. Esto presupone *diseñar los experimentos* que han de llevarse a cabo, planificarlos. Una adecuada planificación puede satisfacer la demanda de datos sin sacrificar la economía del proyecto. La complejidad de la fase de planificación varía mucho con la naturaleza del problema.

El diseño de un experimento puede extenderse no sólo a la elección del más adecuado, sino también al modo de ejecutarlo.

Existe una evidente analogía entre experimentación y comunicación a través de un canal con interferencias. Las *entradas* son los estados de la naturaleza, y las *salidas*, los resultados del experimento. La información transmitida mide el promedio de incertidumbre que queda eliminada por el experimento acerca de los estados de la

naturaleza. Será ejecutado aquel experimento con mayor información esperada. El proceso es el de la llamada *caja negra*, según el esquema siguiente.



En todo sistema hay muchas variables de entrada que pueden afectar a una respuesta. Es de esperar que estas variables de entrada sean controlables. En los sistemas aleatorios la relación entre entradas y respuestas sólo puede expresarse en *términos probables*. A efectos de una investigación del sistema las variables controlables son de dos clases: variables *diseñadas*, que son modificadas en distintas ejecuciones del experimento, y el resto de variables, que se dejan constantes.

Hay *variables de entrada* que no son directamente controlables. En este caso se asignan *aleatoriamente* para cada ejecución del experimento; el efecto de las variables incontroladas aparece entonces como un efecto aleatorio sobre la respuesta, un efecto que se suma a la aleatoriedad del sistema. En la práctica es difícil con frecuencia establecer la diferencia entre variables de entrada diseñadas y variables con aleatorización externa al sistema.

Supongamos, por ejemplo, que en un punto negro de una carretera se han observado cuatro accidentes en un mes. Como consecuencia de estos hechos se colocan adecuadas señales de tráfico, y en el mes posterior a esta señalización se produce un solo accidente de tráfico. Estos hechos, por sí solos, proporcionan poca base para concluir que el control del tráfico mediante las señales ha sido la causa determinante de la disminución de accidentes. Así, supongamos que la frecuencia mensual de accidentes en ese punto constituye una *serie aleatoria* de la cual el valor cuatro es un valor alto: valor que motivó

la señalización. Luego, incluso sin esta señalización, cabría esperar un decrecimiento en el número de accidentes en el mes después de que se pusieron las señales.

Una comparación más significativa puede hacerse si se dispone de la estadística de accidentes, no sólo de un mes antes y otro después de la señalización, sino de una serie de meses en ambos sentidos, antes y después de colocar las señales. Entonces entramos en el análisis de una *serie temporal*. Aun la elección no aleatoria del tiempo de observación del fenómeno reseñado produciría escaso efecto sobre la valoración de la serie. Aunque esta valoración se decantara en el sentido de que las señales fueron la causa de la disminución de accidentes, no estamos autorizados a darle validez absoluta. Existen otras posibles concausas. Los conductores han podido ser influidos por la prensa después de haber ocurrido tres y cuatro accidentes, puede haber habido lluvia que haya hecho resbaladiza la carretera, etc. Algún tipo de control puede ser obtenido mediante el estudio de *rachas* en tramos de la carretera: un diseño de *series temporales múltiples*. Cook y Campbell² llaman a estos experimentos semi-controlados de series truncadas, o de series multiples temporales, "cuasi-experimentos".

4.2.3. Circunstancias de la recogida de datos. En líneas generales el diseño de una investigación estadística debe planificar cuántos y qué clase de datos han de recogerse, como hemos indicado. Respecto a la primera cuestión, cabe señalar que a veces se recogen más datos de los necesarios. ¿Por qué recoger datos si no hay propósito de utilizarlos luego?

El fácil acceso a microordenadores, minicomputadoras y macrocomputadoras, junto con equipos de grabación, hace posible registrar grandes masas de datos con relativo poco esfuerzo. Así, por ejemplo, a un paciente al que se ha de intervenir quirúrgicamente se le pueden acoplar instrumentos que registren su temperatura, número de pulsaciones, presión arterial, cambios en dicha presión,

² T. D. Cook y D. T. Campbell, *Experimental Designs*, (Nueva York 1957).

etc. Un microordenador puede determinar las frecuencias con que aparecen las medidas registradas. Lo mismo puede decirse de aparatos que miden automáticamente temperaturas, humedad, presión atmosférica, etc., del medio ambiente, a los que se pueden aplicar microordenadores que registran gráficamente las observaciones. La información así recogida puede ser inmensa, y se impone una *selección* antes de embarcarse en la aventura de una recogida de datos tan amplia.

Será, posiblemente, más acertado recoger menos datos, más distanciados (uno cada hora, mejor que uno por segundo) y más orientados hacia las necesidades o requerimientos de los usuarios. La experiencia ha demostrado que el *control de calidad* de un proceso productivo es mejor si se hace por vía muestral: se toma periódicamente una muestra de la cadena productiva y se lleva al laboratorio para un análisis exhaustivo y minucioso; si las piezas no satisfacen el nivel de calidad requerido, se para la cadena y se corrigen los fallos que ocasionan la producción defectuosa. Son evidentes las ventajas de este sistema frente al tradicional que consistía en inspeccionar toda la producción: producción defectuosa que se pudo evitar, errores en la inspección debidos a la fatiga que implica controlar una gran masa de datos contra reloj, etc., aparte del gasto correspondiente.

Muchas veces se recogen datos en la idea de que algún día puedan utilizarse. Ese día no suele llegar, y si llega los datos habrán envejecido. En muchos cuestionarios de encuestas proliferan las preguntas que, además de fatigar al encuestado, no son luego procesadas. Se han de recoger los datos pertinentes para obtener los logros y metas de la investigación.

Hay investigaciones cuyas pruebas son muy dispendiosas, como todas las que se realizan en investigaciones del espacio o las nucleares. En estos casos el número de datos ha de ser especialmente considerado.

¿Cómo y dónde han de recogerse los datos? La contestación a estas preguntas depende del plan y clase de investigación. Aquí no

caben soluciones generales. Los datos obtenidos dependen del tipo de escala de medida y de cómo se obtiene la cuantificación (en el caso de datos cuantitativos). Esto es importante en las investigaciones sociales. El *dónde* ideal es el lugar en que se producen.

Otros aspectos no menos importantes en la recogida son el *quién* debe recogerlos y *cuándo* ha de hacerse la recogida. Los datos han de recogerse por expertos, gente entrenada para el tipo de investigación que ha de hacerse y con conocimientos estadísticos suficientes. Deben tener también conocimientos psicológicos cuando se trata de encuestar a personas. El *tiempo* en que debe de hacerse la investigación puede tener importancia para su éxito. Puede ser necesario llevarla a cabo durante cierto período de tiempo. No tener en cuenta estos detalles puede conducir a la obtención de datos irreales o carentes de utilidad.

4.2.4. Tipos de recogida de datos. En estadística el conjunto total que se está estudiando se llama *universo* y puede estar constituido por personas, estaturas, familias, sociedades de un cierto tipo, regiones, naciones, lenguajes, atributos, etc. En la literatura suele hablarse indistintamente de universo o de *población*. Esta última palabra tiene su origen en la demografía, que estuvo en el inicio de la estadística. Nosotros preferimos reservar la palabra población para el conjunto *numérico*, esto es, para el resultado de medir o contar los elementos del universo. Así, para el universo de soldados de un regimiento, tenemos distintas poblaciones: la población formada por las estaturas de esos soldados, la de sus pesos, la de sus perímetros torácicos, la de sus meses cumplidos, etc.

Hay tres tipos de recogida de datos: las investigaciones observacionales, las muestrales y censos, y las pruebas experimentales.

En las *investigaciones observacionales* se guardan registros de toda clase de observaciones disponibles, sin pensar en si son o no representativas de la población. Estos registros se mantienen en todas las sociedades del mundo: registros de nacimientos y fallecidos, de matrimonios, de miembros de confesiones religiosas, de títulos

expedidos, de socios de organizaciones políticas, sociales y deportivas, de temperaturas observadas, caída de agua por metro cuadrado y por años o meses, tratamientos administrados a pacientes por un médico, enfermos de un hospital, etc., etc. Estos registros, además de cumplir con sus fines específicos pueden utilizarse para diversas clases de estudios. Tal ocurre, por ejemplo, con los *padrones municipales*, que se usan en muchos estudios en los que entra el factor población. En muchos casos los trabajos conducentes a la explotación de las observaciones registradas, dada la obtención no aleatoria de éstas, no permite extraer conclusiones aplicables a toda la población. Un ejemplo de registro de datos lo constituyen las *historias clínicas* de la consulta de un médico, donde constan todos los datos de interés de cada paciente: constituyen una muestra muy sesgada de la población. Otro médico distinto registrará observaciones distintas o de distinto modo. No es posible, para un investigador, extraer en principio de ellas conclusiones válidas para toda la población. Los *censos* son investigaciones exhaustivas de la población; las *muestras* son estudios de una parte de la población. Los censos no suelen considerar el ciento por ciento de la población porque de ordinario no son accesibles todas las unidades: es difícil evitar omisiones y duplicaciones.

Las *muestras* pueden ser probabilísticas o no. Entre las no probabilísticas las más utilizadas son: las *opináticas* o intencionadas, en las que el investigador selecciona aquellas unidades que cree que son más representativas de la población; las de *conveniencia*, donde elige las unidades que son más convenientes o más accesibles; las de *cuota*, en las que se elige un número determinado de unidades, la cuota, de cada grupo específico; las *depuradas*, donde el investigador elimina las unidades de un cierto tipo y elige una muestra de las restantes. Estos tipos de muestras tienen valor científico limitado. Las únicas muestras que permiten hacer inferencias válidas para toda la población son las probabilísticas, aquéllas en las que interviene el azar, por lo menos en una de las fases de su elección. Procedimientos

para elegir una *muestra aleatoria* pueden verse en cualquier libro de estadística aplicada³.

Los datos recogidos en *pruebas experimentales* obedecen a una planificación previa. Los que proceden de *diseños aleatorizados* son preferibles a los *sistemáticos*. En los aleatorizados, a fin de obtener más precisión, mayor repetibilidad, se ordena la población en bloques que agrupan unidades experimentales homogéneas. Se obtiene una muestra aleatoria de *bloques* dentro de la población y luego una muestra aleatoria de unidades dentro de cada bloque. Las unidades se suelen llamar *tratamientos*, y se asignan aleatoriamente dentro de cada bloque del diseño o de modo selectivo sistemático. Se ejecuta el experimento y se recogen los datos de cada unidad experimental, con la idea de comparar los tratamientos o de describir la acción de los tratamientos sobre las salidas o respuestas para cada unidad experimental; estas respuestas pueden obtenerse para un gran número de variables.

4.2.5. Centros de recogida de datos

Las oficinas de recogida de datos aparecen por doquier. El poder judicial, el legislativo, el ejecutivo, los municipios, diputaciones y comunidades autónomas, tienen las suyas. El Instituto Nacional de Estadística coordina la recogida de datos a nivel estatal y se ocupa de su publicación para que sean explotados por todo tipo de usuarios. Todos los países disponen de organismos que se ocupan de recoger toda clase de información. Las Naciones Unidas mantienen diversas oficinas que se encargan de recoger datos a nivel internacional. Destaquemos las de la UNESCO y las de la FAO. La Unión Europea dispone de EUROSTAT que también se ocupa de homologar la legislación y recogida de datos de los órganos de estadística nacionales. El *Instituto Internacional de Estadística* (ISI) realiza esta última función a nivel mundial. Numerosas empresas privadas recogen información que elaboran y ponen a disposición de sus clientes.

³ Puede verse, por ejemplo, nuestra *Bioestadística*, ed. Tebar Flores, (Madrid 1978), o nuestra *Estadística para la ciencias jurídicas*, Tirant lo Blanc, (Valencia 1993).

Es imposible decidir en la economía, los negocios, la política social, sin poseer los datos adecuados y fiables. Centros de investigación, universidades, institutos, corporaciones, industrias, recogen gran cantidad de datos que les sirven de base en sus investigaciones.

La fiebre de recoger y almacenar datos ha invadido a todo el mundo, y parece formar parte de la vida de los individuos en sus comunidades. La ayuda de los estadísticos en la planificación de los programas de recogida de datos es cada vez más necesaria.

4.3. Clasificación de datos

4.3.1. Generalidades. Una vez obtenidos los datos, la primera labor del investigador es proceder a su clasificación. *Clasificar* es agrupar juntas cosas similares. La clasificación implica, pues, conocer cuándo dos entes son similares y cuándo son distintos. De aquí la importancia que tiene en la clasificación la idea de *similitud* y de *distancia*. La clasificación presupone la existencia de un conjunto de entes u objetos distintos, pero donde pueden existir homogeneidades.

Hay ciertas reglas generales que deben observarse para hacer una buena clasificación. Citaremos las siguientes:

- a) la característica o propiedad elegida para llevar a cabo la clasificación debe ser mantenida a lo largo de todo el proceso;
- b) los conjuntos que ocupan un mismo rango jerárquico deben ser disjuntos dos a dos y cubrir todo el campo;
- c) los distintos procedimientos para clasificar los elementos han de conducir a la obtención de los mismos grupos al final del proceso.

Aristóteles desarrolló clasificaciones de la ética, lógica y política; clasificó animales y partes de un animal. Distinguió unos 500 animales, desde los organismos marinos hasta el hombre y los clasificó en géneros y especies. **Linneo**⁴ estableció la clasificación de plantas y

⁴C. Linneo, *Species plantarum* (Estocolmo 1753).

animales que aún subsiste. Pero fue **Darwin**⁵ quien ordenó en forma de árbol el proceso físico de la evolución.

A partir del segundo cuarto del siglo XX empiezan a desarrollarse procedimientos de *clasificación formal* en ciertas disciplinas: **Kulczynski**⁶ en sociología, **Zubin**⁷ en psiquiatría, **Tryon**⁸ en análisis factorial. Pero el libro que señala una nueva era en la clasificación es el de Sokal y Sneath⁹. En él se propone un nuevo sistema de clasificación biológica que comprende la recogida de datos, la selección y codificación de caracteres, el cálculo de similitudes, la construcción de grupos jerárquicos y su valoración mediante técnicas estadísticas. El programa de **Sokal y Sneath** ha sido aceptado, en líneas generales, aun cuando algunos detalles han sido objeto de controversias por parte de los taxonomistas tradicionales.

La fuente básica para los estudios de clasificación es la *matriz de datos* donde las variables se disponen en columnas y los individuos u objetos en filas, o al revés; los elementos de la matriz son medidas de los individuos correspondientes a las respectivas variables. La elección de variables a medir determina el resultado final de la clasificación. Esta elección debe hacerse informalmente, de modo subjetivo. La naturaleza de los objetos determinará esta preselección: no puede describirse en los mismos términos un elefante que una hormiga, o la labor de un ejecutivo y la de un obrero de la construcción. Dada la dificultad de seleccionar y manejar las variables que han de utilizarse en la clasificación de objetos, existe la tendencia a clasificar variables y objetos *simultáneamente*, tal como se hace en el análisis de conglomerados (cluster analysis).

Otro procedimiento es el *lingüístico*, donde objetos, variables y conglomerados se reducen a palabras del sistema. Los datos en un sistema lingüístico constan de enunciados en un lenguaje artificial de estructura conocida. Los conglomerados se forman por la construcción

⁵ C. Darwin, *The origin of species* (Londres 1859).

⁶ S. Kulczynski, *Bull. Int. Acad. Pol. Sci. B*, 2, 57, 1928.

⁷ J. Zubin, *Psychiatry*, 1, 237-247, 1938.

⁸ R. C. Tryon, *Cluster analysis* (Ann. Arbor, 1939).

⁹ R. R. Sokal y P. H. A. Sneath, *Principles of numerical taxon* (San Francisco 1963).

de nuevas palabras correspondientes a conceptos expresados en los enunciados. Las nuevas palabras requieren nuevos enunciados para definirlos, pero pueden simplificar los enunciados originales. Así, las expresiones Comunidad Europea, Bloque del Este, Iberoamérica, Grupo Afroasiático, simplifican la nomenclatura a la hora, por ejemplo, de votaciones en la ONU.

Muchas técnicas de clasificación exigen cálculos de *distancias* entre todos los pares de objetos, antes de llevar cabo algún algoritmo de agrupación. Para variables cuantitativas, la medida más sencilla es la *distancia euclídea*.

Si las variables se miden en diferentes escalas, deben ser tipificadas de antemano, lo que permite llevar a cabo una transformación que deja la varianza constante.

Cuando se quiere recoger la dependencia existente entre las variables, se utiliza la *distancia de Mahalanobis*, que tiene, además, la propiedad de ser invariante por transformaciones afines.

En el análisis de conglomerados hay dos tipos básicos de clasificación: aglomerativa y divisiva. En la clasificación *aglomerativa* se parte inicialmente de los objetos que se van fusionando progresivamente para formar grupos sucesivos de tamaño creciente. En la clasificación *divisiva* se parte del conjunto total que se divide progresivamente (de forma dicotómica en general) hasta lograr un grado aceptable de subdivisión.

La clasificación puede ser *jerárquica* y *no jerárquica*. En la clasificación no jerárquica se forman grupos no homogéneos sin establecer relaciones entre ellos; en la jerárquica la aglomeración es progresiva según crece la homogeneidad, y el grado de homogeneidad se mide mediante un índice de similitud. Las clasificaciones jerárquicas suelen ser aglomerativas.

Dentro de esta tipología general hay una amplia gama de métodos clasificatorios. Así, los aglomerativos pueden ser *solapados*, cuando hay datos que pueden pertenecer a dos grupos, o *exclu-*

yentes, en caso contrario. Una buena clasificación es "excluyente". Hay métodos *directos* que una vez asignado un dato a un grupo no lo eliminan del mismo, y los hay *iterativos* que corrigen sus propias asignaciones.

Una clasificación jerárquica aglomerativa adopta la forma de un árbol (*dendograma*) y se obtiene por el siguiente algoritmo:

a) Hallar el par de elementos menos distantes para formar un grupo o "cluster".

b) Definir de algún modo la distancia entre este "cluster" y el resto de elementos.

c) Considerar este nuevo "cluster" como un elemento y prescindir de sus elementos componentes.

d) Repetir los pasos anteriores hasta que se logre el nivel adecuado de agrupación.

Este algoritmo lleva a distintos métodos clasificatorios según la distancia elegida en la etapa b). Así, Sorensen¹⁰ sugirió utilizar la distancia entre los elementos más dispares o más alejados de cada grupo. Esta técnica se conoce como *estrategia de la distancia máxima*. Floreck y otros¹¹ utilizaron la distancia entre los elementos más similares o más próximos de cada grupo. Es la *estrategia de la distancia mínima*. Sokal y Michener¹² propusieron tomar la distancia entre los *promedios* de distancias de entre los elementos de cada grupo. Lance y Williams¹³ han dado una familia paramétrica de distancias entre los "clusters" que incluye las tres medidas consideradas anteriormente.

No puede darse ningún criterio generalmente aceptado para definir un "cluster". Las gentes tienen sus propias opiniones acerca de lo que debe entenderse por un grupo. Para salvar esta subjetividad

¹⁰ T. Sorensen, Biol. Skr., 1-34, 1948.

¹¹ J. Floreck y al. *Colloq. Math.*, 2, 282-285, 1951.

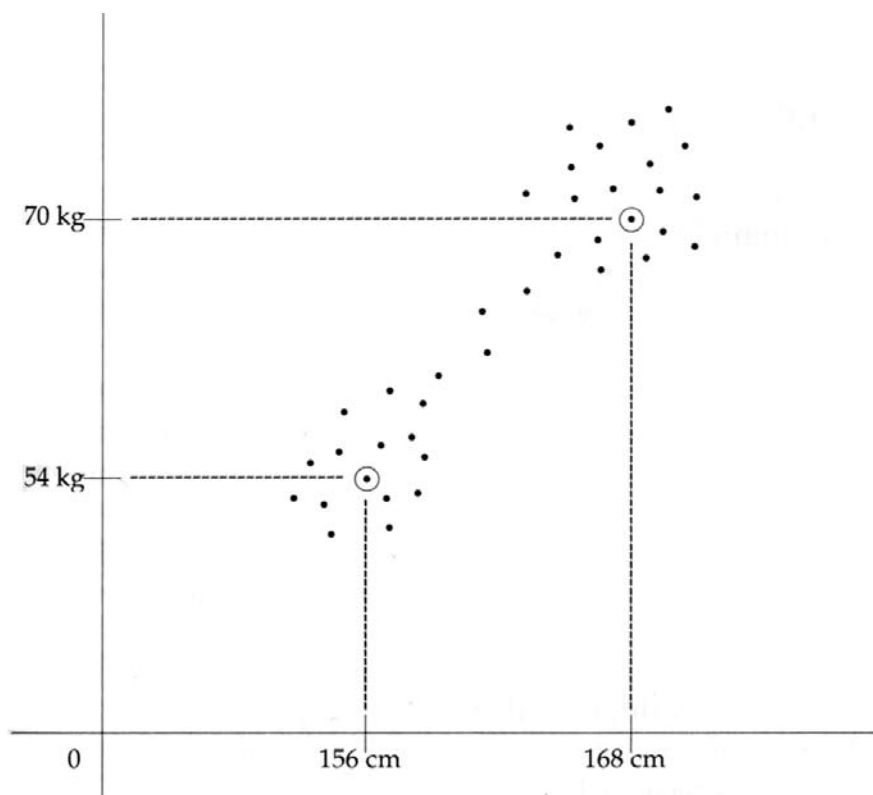
¹² R. R. Sokal y C. D. Michener, *Univ. Kansas Sci. Bull.*, 38, 1409-1438, 1958.

¹³ G. N. Lance y Williams, *Computer J.* 9, 373-380, 1966.

existen *técnicas gráficas* que presentan los datos de modo que el usuario detecta fácilmente las homogeneidades dentro del conjunto general, lo que le conduce a la construcción de "clusters". Así, en la siguiente figura se han representado datos sobre pesos y estaturas de un grupo de personas.

Se distinguen claramente dos grupos en torno a los pares de números (156,54) y (168,70). No es difícil deducir que esos dos grupos diferenciados corresponden al grupo de mujeres y al de hombres, respectivamente.

Las variables continuas, si son bien elegidas, presentarán con frecuencia histogramas o gráficos bidimensionales con dos o más *modas* que ponen de manifiesto los distintos grupos que componen el conjunto total.



4.3.2. Aplicaciones y problemas prácticos

La clasificación se aplica, formal o informalmente, en todo el dominio del pensamiento. A menudo se mantiene la clasificación informal porque las técnicas para una clasificación formal no son apropiadas o no se han desarrollado suficientemente.

En *psiquiatría*, se han utilizado técnicas formales para descubrir grupos de pacientes y grupos de síntomas. En *arqueología*, gran número de objetos, tales como instrumentos de piedra, alfarería, cráneos o estatuas, encontrados en las excavaciones, deben ser agrupados. La clasificación recibe aplicaciones especiales en *fitosociología* (distribución espacial de plantas y animales), en la investigación de mercados (comportamiento del precio de los stocks), en el árbol evolutivo de los lenguajes, en la agrupación para formar distritos electorales, en la agrupación de galaxias, etc.

El verdadero laboratorio de técnicas de agrupación sigue siendo la *taxonomía*, clasificación de animales y plantas. Muchas técnicas de la moderna clasificación han surgido por obra de taxonomistas numéricos. La revista *Systematic Zoology* es quizás la más importante para la investigación sobre clasificación, y para los debates sobre filosofía y principios de la clasificación. Hemos de destacar también el desarrollo de los árboles evolutivos que utilizan ADN, ARN y secuencias de proteínas.

Hay muchas técnicas de análisis "cluster", pero no muchos procedimientos para decidir entre ellas. Se investiga en el desarrollo de técnicas de valoración de resultados y métodos para la comparación de "clusters". En estadística se supone que los objetos constituyen una muestra aleatoria de alguna población y hay que ver cómo los "clusters" de la muestra se acomodan a los de la población. Surgen muchos problemas dificultosos: apropiada definición de consistencia, detección de modos para definir el número de "clusters", fiabilidad de los "clusters" obtenidos, elección de modelos para la agrupación simultánea de individuos y variables, entre otros muchos.

Por otra parte se están desarrollando tipos de estructuras de datos y técnicas de cálculo y de evaluación, apropiados a un gran número de objetos diversos.

Un problema en el que es preciso progresar aún es el que atañe a la clasificación de datos incompletos. Esto se pone de manifiesto de un modo especial en la diagnosis médica, donde a un paciente - al que se ha de atribuir una enfermedad- no se le suelen, o no se le pueden, hacer todas las pruebas imaginables.

4.4. La reducción de datos

La reducción de los datos observados a formas *concentradas* es uno de los tres aspectos más importantes del método estadístico. Los otros dos son el estudio de poblaciones y el análisis de la variación. Pertenecen a la entraña misma de la filosofía de la estadística donde lo colectivo priva sobre lo individual.

La aplicación del aparato estadístico a una serie de datos hace posible obtener una *nueva proposición empírica* que se distingue de los datos primarios directos por un nuevo conjunto de propiedades y que, como vimos, puede desempeñar el papel de *hecho de la ciencia*. Las manipulaciones estadísticas de una serie más o menos larga de datos nos permiten formar, en vez de un conjunto de proposiciones sobre resultados de simples experimentos, una proposición simple, *resumen estadístico*.

En la elaboración de estos resúmenes intervienen distintos procedimientos estadísticos: cálculo de medias, medianas, modas, medidas de dispersión, de asimetría, de curtosis, cálculo de momentos en general, etc. Todas estas *características estadísticas* se distinguen de los datos inmediatos por el hecho de contener conocimiento acerca del fenómeno como *un todo*, lo que aminora la aleatoriedad que conllevan los simples datos. La razón está en que el resultado de toda reducción estadística es nivelar los distintos elementos de aleatoriedad de los datos.

La simple transición de un cuadro de datos a una tabla de frecuencias permite observar peculiaridades del fenómeno que produjo los datos que no aparecían a primera vista. Por eso decimos que la *tabla de frecuencias es más informativa que el cuadro de datos*. Esta expresión no se refiere tanto a la cantidad de información cuanto a la facilidad de captación por el sujeto. Todas las técnicas de perecuación, suavizado de datos, ajuste por *medias móviles* a series cronológicas, etc., persiguen esta finalidad. Todos estos procedimientos

antiguos han sido sustituidos en la actualidad por otros mucho más potentes.

Los ordenadores actuales permiten procesar grandes cantidades de datos y obtener automáticamente toda clase de *estadísticos*. Los usuarios de los ordenadores emplean frecuentemente estos resultados indiscriminadamente, sin hacer un estudio previo de la estructura de estos datos. Un examen preliminar de las representaciones analíticas y gráficas (*diagramas, histogramas, etc.*) puede poner de manifiesto ciertas características de esta estructura: datos que se separan excesivamente del centro de la distribución, esto es, datos espurios (*outliers*), que sería conveniente eliminar de los datos objeto de estudio; plurimodalidad, que puede sugerir mezcla de varias hornadas o generaciones de datos, cada una de ellas con su propia moda; etc. La media *total*, la desviación típica *total*, etc., no ponen de manifiesto las discrepancias posibles entre medias, desviaciones típicas, etc., *parciales*.

La reducción de datos sigue hoy dos caminos principales. El primero, el clásico, el que adoptaron ya los "aritméticos políticos"¹⁴, con miras a la detección de características comunes, y que condujo más tarde al descubrimiento de las leyes de estabilidad de las frecuencias, es el que se aplica en las técnicas generales de regresión, análisis de la varianza, análisis canónico de poblaciones y análisis canónico de variables.

El segundo camino consiste en *reducir la dimensión* del espacio de datos. Las técnicas más empleadas para reducir la dimensión espacial de los datos son las de correlación (con todas sus variantes), el análisis de componentes principales y el análisis factorial.

Otros medios de reducir la dimensión del espacio de datos son las transformaciones invariantes, que permiten detectar simetrías y eliminar así elementos superfluos. Estas transformaciones pueden

¹⁴ En 1660 encontramos la palabra *estadística* en el curso que Hermann Conring imparte en la Universidad de Helmstedt con el título *Staatskunde*. Surge entonces la *aritmética política* de la escuela alemana con Conring y sus discípulos Schmeitzel y Achenwal, continuada luego por la escuela inglesa encabezada por Graunt y Petty. Con la aritmética política se abandona la descripción para orientarse hacia la recogida y análisis de datos exclusivamente numéricos, observados con fines específicos, y en base a los cuales se hacen estimaciones por medio de conjeturas. Aunque ausente aún la probabilidad en estas predicciones, se observan ya, en la aritmética política, los elementos básicos del método estadístico.

dejar invariantes elementos de un problema, subconjuntos del problema o todo el problema.

Los *estadísticos suficientes* o *suficientes minimales* y los *estadísticos subsidiarios* (ancillary) reducen también el espacio de datos, pero su definición rigurosa se sale del campo descriptivo, por exigir el concepto de probabilidad.

De modo general, todas las técnicas utilizadas en los problemas de clasificación utilizan de una manera u otra la reducción de datos.

4.5. La interpretación de los datos

Nos vamos a referir aquí al análisis puramente descriptivo de los datos, esto es, la exploración de los datos en base a su recogida, clasificación y reducción, a fin de descubrir las características que presentan más interés. Es el objeto de la estadística descriptiva clásica.

El primer paso del *análisis descriptivo de los datos* es valorar su estructura, el tamaño de la muestra, si son el resultado de un estudio parcial, y si son suficientes las variables observadas o se han omitido algunas relevantes al problema.

Los datos pueden ser de archivos, registros, *datos base* en general, esto es, datos en cuya obtención no ha tenido parte el estadístico. Entonces es necesario examinar su adaptación al problema que nos ocupa, su depuración o corrección de posibles anomalías de origen. En el caso de que se trate de una muestra no seleccionada por el estadístico, será preciso analizar si es *representativa*, cosa que no será siempre fácil.

Las técnicas que proporciona el análisis interno de los datos son variadas y se acomodan frecuentemente a la disciplina en que se aplican, sugeridas muchas veces, no sólo por los estadísticos, sino también por los cultivadores de la propia disciplina. Así, por ejemplo, **Eldridge** y otros¹⁵ hacen un estudio sobre empleo de las estadísticas en la administración.

Con el nombre de *combinación de datos u observaciones* solía entenderse antiguamente el análisis numérico de datos. Las hábiles

¹⁵ M. D. Eldridge et al. *Amer. Statist.*, 37, 111-122, 1982.

conjeturas de **Halley** o **Graunt** tuvieron su base en datos combinados, tablas u otros agregados, que les permitieron observar las regularidades en los fenómenos, sobre todo de supervivencia. Fueron los primeros análisis estadísticos, donde el énfasis estaba puesto en la condensación y en la totalización.

Aquí nos referimos a la combinación de *conjuntos separados de datos*, cada uno de los cuales puede dar lugar a un análisis particular. Esta combinación puede surgir de dos modos distintos. Primero, los distintos conjuntos pueden provenir de distintas investigaciones, donde se han usado quizás distintos diseños y distintas técnicas. Segundo, los datos tienen por sí una estructura propia, por su origen o naturaleza; una estructura relativamente compleja en cuyo caso una estrategia razonable para manejarlos adecuadamente consiste en dividirlos en subgrupos más sencillos para analizarlos por separado; en un segundo análisis emergen las propiedades de las componentes. Las técnicas estadísticas en estos dos casos pueden ser las mismas, pero supuestos de homogeneidad o heterogeneidad, errores debidos a la varianza, etc., pueden hacerse en uno u otro caso con mayor grado de confianza y llegarse a conclusiones mejores.

4.6. El razonamiento estadístico

El razonamiento basado en información estadística es muy variado. Depende de los caminos seguidos y de las personas que los llevan a cabo. La idea que defendemos es que todos estos tipos de razonamientos tienen cabida dentro de una *filosofía unificada*.

Al razonamiento estadístico se llegó debido a las dificultades encontradas en muchas áreas de investigación empírica para explicar fenómenos individuales, y a la posibilidad de obtener importante y útil información en relación con los *fenómenos de masa*. El estudio de las distribuciones de frecuencias de datos resultó muy útil en algunas disciplinas. Las medidas implican error y aproximación, y esto sólo puede ser explicado estadísticamente. Con el estudio llevado a cabo en el cálculo de errores se llegó al descubrimiento de *distribución normal* o “Campana de Gauss”.

La *lógica del razonamiento estadístico* puede tomar muchas formas. Estas formas dependen de si se trata de elegir una acción,

aceptar un enunciado, rechazar una hipótesis, etc. Todas serán estudiadas a su debido tiempo.

De un modo general hay dos métodos fundamentales -y gentes dedicadas a las investigaciones que los siguen- para investigar un territorio científico. El primero, el que nos ocupa ahora, no se sale de lo empírico, de los datos que se poseen. El otro, por el contrario, va y viene del mundo de los hechos al de los conceptos, de lo empírico a lo teórico, y recíprocamente.

Si no nos salimos de los datos, lo más que podemos hacer es establecer algún orden entre ellos, investigar conexiones entre las principales características de orden cuantitativo, temporal, de simultaneidad, coincidencia, exclusión mutua, etc. De este estudio puede deducirse si un fenómeno acompaña a otro, si los cambios de uno guardan relación con los del otro, etc. Una tarea no menos importante es el análisis de los medios lingüísticos de expresar conexiones empíricas y el paso de un lenguaje a otro; por ejemplo, el paso de una tabla a una fórmula o a un gráfico.

Realizadas las etapas descritas del método, puede predecirse la conducta del sistema o encontrar una característica a partir de otra. Llegamos así a la formulación de las llamadas *proposiciones universales sintéticas*, que habrán de confrontarse con nuevos hechos para transformarse en *leyes empíricas*.

4.7. La confrontación de resultados

Toda conclusión obtenida como resultados del análisis de los datos ha de ser *convalidada*. Esta convalidación nos conducirá a su confirmación o rechazo.

El modo natural de llevar a cabo la convalidación de las conclusiones de un análisis de datos consiste en someterlos a la comparación con nuevos datos. Distinguimos la convalidación de la contrastación. La *convalidación* confronta las conclusiones derivadas de unos datos con las que se deducen de nuevos datos; la *contrastación* confronta conclusiones empíricas con *modelos* teóricos, pone a prueba las teorías ante el tribunal de la experiencia.

Aquí nos ocuparemos del primer nivel de confrontación, el de las conclusiones empíricas, esto es, la *convalidación*.

Pensemos por un momento en un físico que somete un gas encerrado en un recipiente a distintas presiones e igual temperatura y que observa las variaciones del volumen que ocupa; o en un químico que descompone agua y observa los volúmenes obtenidos de oxígeno e hidrógeno; o en un ingeniero agrónomo que ensaya dos abonos distintos en parcelas de tierra análogas; o en un médico que ensaya diversas drogas en la curación de una enfermedad. Estos diversos investigadores científicos enunciarán los resultados obtenidos con proposiciones como éstas: a igual temperatura el volumen ocupado por un gas es inversamente proporcional a la presión a la que se le somete; en el agua hay dos partes de hidrógeno por una de oxígeno; el abono A produce mejor rendimiento que el abono B; de todas las drogas ensayadas para combatir la enfermedad F, la mejor es la D.

Estas proposiciones se llaman *sintéticas*, pues expresan el resultado conjunto sintético, resumido, de observaciones. Estas proposiciones, y muchas otras que oímos o leemos cada día no son admitidas por la comunidad científica mientras no son avaladas por nueva experiencia, esto es, mientras no son *verificadas* o *corroboradas* por nuevas pruebas. La palabra corroboración nos recuerda a Popper y su método rígido de falsación de proposiciones. La verificación se refiere a la constatación de que una proposición es verdadera o falsa. Hay varios modos de posibilitar esta verificación. **Hans Reichenbach**¹⁶ distingue la posibilidad técnica, la posibilidad lógica, la posibilidad física y la posibilidad meta-empírica.

La posibilidad que aquí nos interesa es la técnica, es decir, la que cuenta con los medios para verificar la proposición. Así la proposición: "la estatura media del español está en torno a los 170 cm.", es verificable técnicamente; existen los instrumentos suficientes para su comprobación. Pero la proposición: "la temperatura del núcleo solar alcanza 20 millones de grados centígrados", no es verificable directamente, técnicamente; sí lo es físicamente.

El físico -en nuestro caso Boyle- no se contentó con hacer una prueba, sino muchas, tomando diversos gases a igual temperatura y sometiéndolos a distintas presiones. Otros físicos continuarían realizando nuevas pruebas. La proposición sintética formulada al principio como hipótesis de trabajo, al no ser desmentida por los

¹⁶ H. Reichenbach, *Experience and prediction*, (Chicago 1938).

hechos, pasó a ser reconocida como *ley empírica*. Lo mismo puede decirse del resto de proposiciones formuladas a lo largo de la historia de la ciencia empírica.

La *repetición* de observaciones o experimentos es la vía obligada para verificar técnicamente, para convalidar, las proposiciones sintéticas emanadas de un conjunto de datos. Hemos de aclarar que los experimentos utilizados en esta etapa han de repetirse en las mismas condiciones, o lo más semejantes posibles; todos sabemos la imposibilidad de repetir exactamente un experimento. Los experimentos en que se modifican algunas de las condiciones iniciales dan lugar a los llamados *planes factoriales*.

Muchos investigadores consideran natural planificar un experimento único, para evitar una variedad de resultados que dificultan la toma única de decisión. Hay quienes piensan que es mejor efectuar análisis individuales de datos en una sola etapa, a fin de evitar la iteración de análisis repetidos. No es realista pensar que un buen análisis es mejor si se asienta en tales simplificaciones: la experiencia -y la lógica estadística- enseña que el análisis es tanto mejor cuanto más se extiende a *gran número* de datos, y que la repetición de observaciones o experimentos es provechosa. Esta última afirmación atañe directamente al tema que nos ocupa, a la etapa de convalidación de las conclusiones derivadas del análisis descriptivo de los datos.

En defensa de la repetición de datos, experiencias, observaciones, diremos que la diferencia entre lo *indicativo* y lo que tiene visos de *conclusivo* sólo puede ponerse de manifiesto con pruebas repetidas realizadas dentro del mismo análisis, lo que garantiza su homogeneidad. La brecha que separa lo que se considera como una *indicación* interesante y lo que ha de constituir una *conclusión*, aumenta a medida que la estructura de los datos se hace más compleja.

Cuando se indagan meras indicaciones hay que dejar libertad al uso adecuado e informal de procedimientos. Cuando nuestro propósito es preguntar a los datos lo que señalan o sugieren sería una locura apelar a formalidades o a reglas y principios que van más allá de lo que la experiencia empírica nos ofrece en tales situaciones. En una primera fase hemos de preguntar a los datos lo que *sugieren* dejando para una segunda lo que *establecen*.



Carl Gustav Hempel

5. La explicación

5.1. Introducción

Las palabras *probar, demostrar, derivar, explicar*, se hallan ya en el mundo medieval y antiguo. La demostración silogística, como inicio de las teorías deductivas, reconoce su paternidad en **Aristóteles**.

El uso de leyes estadísticas, como premisas de argumentos explicativos se desarrolló en la segunda mitad del siglo XIX. Y esto se llevó a cabo paulatinamente, gracias a los avances de la *teoría* de la probabilidad y de la estadística, y por el cambio sufrido en el pensamiento filosófico, donde filósofos como **Cournot** y **Charles Peirce** defendieron el indeterminismo y la existencia del azar en la naturaleza. Peirce argumentó que el *azar en forma de espontaneidad, es necesario para explicar los fenómenos de crecimiento, desarrollo, variedad y regularidad en el universo*¹⁷.

Desde 1940, buena parte de los estudios relativos a la explicación científica son comentarios directos o indirectos del artículo escrito por **Carl Gustav Hempel** titulado *The function of general laws in History* (1942), y del publicado por Hempel y **Oppenheim** con el título *Studies in the logic of explanation* (1948). Estos artículos presentan una clara y explícita forma de la teoría llamada de la *subsunción en la explicación*, que consiste en lo siguiente: se explica un hecho o suceso particular subsumiéndolo bajo leyes generales, esto es, probando que ocurrió de acuerdo con esas leyes, en virtud del cumplimiento de ciertas condiciones antecedentes especificadas.

¹⁷ C. S. Peirce, *A theory of probable inference* (1892). En *Collected papers* (Cambridge, Mass., 1932) (Nueva York 1892).

*La explicación de una regularidad general, por el contrario, -escriben Hempel y Oppenheim en la obra citada- consiste en subsumirla bajo otra regularidad más comprensiva, bajo una ley más general. Siguiendo la sugerencia de **William Dray**¹⁸, este concepto de explicación suele llamarse el “covering-law model”, o simplemente “modelo de Hempel” o de leyes inclusivas.*

Ya en el artículo de 1942 señalaba Hempel que hay algunas explicaciones de carácter estadístico: *la ocurrencia del suceso a explicar puede resultar altamente probable por las condiciones iniciales que acompañan las hipótesis de probabilidad*.¹⁹ Distinguió claramente dos casos de modelos explicativos de este tipo: uno que implica leyes causales o deterministas y otro que supone leyes estadísticas. Al primer caso lo denominó “modelo de explicación nomológica deductiva”, y es al que dedicó sus primeros esfuerzos. Del segundo modelo, el que trata de las *explicaciones estadísticas*, se ocupó más tarde. El primer tratamiento pleno que da al modelo estadístico está contenido en su artículo *Deductive-nomological vs. Statistical explanation*²⁰, datado en 1962. A este trabajo siguieron estudios críticos que inspiraron a Hempel sucesivas modificaciones.

5.2. La explicación científica

Uno de los objetivos de la ciencia es explicar los fenómenos del mundo de nuestra experiencia y responder a los *¿qué?* y a los *¿por qué?* Sobre este punto están de acuerdo todos los conceptos relativos a la explicación científica, aunque haya disparidad de opiniones acerca de su función y características esenciales. Analizaremos ahora el concepto de ley y la estructura de los argumentos explicativos, principalmente en relación con la estadística.

Por *ley universal* entendemos aquí un enunciado con validez condicional o general, sometido a confirmación o refutación por hallazgos empíricos posteriores. El que sea una ley indica que los datos

¹⁸ W. Dray, *Laws and explanation in History* (Oxford 1957).

¹⁹ Op. cit.

²⁰ C.G. Hempel, *Deductive-nomological vs. statistical explanation*, en *Minnesota studies in the philosophy of science*, III, editado por H. Feigl y G. Maxwell (Minneapolis 1962).

adecuados, disponibles hasta el momento, avalan dicho enunciado. Con relativa frecuencia se habla de *hipótesis universales*, en vez de *leyes universales*.

Diremos que una hipótesis universal afirma una regularidad del siguiente tipo: *Siempre que ocurre un suceso de una clase específica C en cierto tiempo y lugar, sucede otro suceso o hecho de otra clase específica E en otro tiempo y lugar, relacionados de modo específico con el tiempo y lugar en que acaeció el primer suceso*. Los sucesos de la clase C se dice que son *causa* de los correspondientes a la clase E, llamados *efectos*.

La función de las hipótesis y leyes generales, en las ciencias generales, consiste en la conexión de hechos y pautas que habitualmente llamamos *explicación* y *predicción*.

La explicación científica de un hecho consta de estos elementos:

- 1) Un conjunto de enunciados que aseveran la existencia de ciertos *hechos* $C_1, \dots, C_n$ en ciertos lugares y momentos;
- 2) Un conjunto de *hipótesis universales* para las cuales se verifica lo siguiente:

a) los enunciados que relacionan causas y efectos, se hallan razonablemente confirmados por pruebas empíricas;

b) de los enunciados en 1) y 2a) puede deducirse lógicamente el enunciado que afirma la ocurrencia del hecho E.

Cuando se trata de una explicación física, 1) describe las *condiciones iniciales* (o de contorno para la ocurrencia del hecho final; 2) contiene las leyes generales, en las que se basa la explicación, que imponen la realización del hecho del enunciado *a explicar*, siempre que ocurran los hechos del enunciado *que explica*. A este segundo enunciado suele denominarse *explanans* y al primero *explanandum*.

Toda explicación científica puede someterse a pruebas objetivas, las cuales incluyen: *comprobación empírica* de los enunciados que establecen condiciones determinantes; ídem de las hipótesis univer-

sales sobre las que se basa la explicación; por fin, una indagación de si la explicación es lógicamente *concluyente*, en el sentido de que el enunciado que describe los hechos a explicar se deduce de 1) y 2).

Un ejemplo de explicación científica sería éste: sumergimos un termómetro de mercurio en agua caliente; al principio baja la columna mercurial y luego asciende repentinamente. La explicación científica será ésta: al principio se dilata el vidrio y aumenta la capacidad para contener mercurio; luego se dilata el mercurio, con un coeficiente de dilatación superior al del vidrio, y así se eleva el nivel del mercurio.

Aquí los enunciados son de dos tipos. Los del primer tipo expresan las *condiciones antecedentes*: un tubo de vidrio, mercurio en su interior, introducción en agua caliente. Los del segundo tipo expresan *leyes generales*: leyes de dilatación del vidrio y del mercurio. De ellos se infiere la *consecuencia* de que el mercurio empieza *descendiendo* para elevarse después.

El lector puede ejercitarse en la explicación del porqué un bastón sumergido en agua aparece como si estuviera quebrado, o del porqué caen los cuerpos. Hay siempre unos *hechos*, unas *condiciones antecedentes*, unas *leyes generales* y unas *consecuencias* que se deducen de los hechos, de las condiciones iniciales y de las leyes.

5.3 La lógica de la explicación

Como indicamos anteriormente la explicación se divide en dos componentes principales: *explanandum* y *explanans*.

El *explanans* comprende dos subclases: una contiene los enunciados $C_1, C_2, \dots, C_k$, que formulan condiciones antecedentes específicas: otra, un conjunto de enunciados $L_1, L_2, \dots, L_r$, que representan leyes generales.

Para que la explicación sea sólida, sus componentes han de satisfacer ciertas *condiciones de adecuación* que pueden dividirse en lógicas y empíricas. Lógicas: el *explanandum* debe ser una consecuencia lógica del *explanans*; el *explanans* debe contener leyes generales necesarias para la derivación del *explanandum*; el *explanans* debe

El siguiente esquema de Hempel resume las características de la explicación.

Suelen distinguirse distintos *niveles de explicación*. El primer nivel consiste en la subsunción de un fenómeno bajo una ley general que conecta directamente las características observables; los niveles superiores requieren el empleo de construcciones teóricas, más o menos abstractas, que funcionan dentro de una teoría más amplia. La explicación de nivel superior cubre procedimientos de distinto carácter; uno de los más importantes consiste en explicar una clase de fenómenos mediante una teoría relativa a su *microestructura*.

Así, la teoría cinética del calor, la teoría atómica de la materia, la teoría electromagnética y cuántica de la luz, y la teoría genética de la herencia, son ejemplos de este método.

El tipo de explicación considerado se denomina *causal*. Las leyes L_i se denominan causales o deterministas. Deberán distinguirse de las *estadísticas*, las cuales expresan que, a largo plazo, un *porcentaje* explícitamente establecido de todos los casos que satisfagan un grupo dado de condiciones estará acompañado de un hecho de un tipo determinado.

Otro uso del término “explicación”, en sentido amplio es aquél en el que no es posible establecer generalizaciones científicas: tal es el caso de los comportamientos humanos o de animales ante situaciones dadas, cuya reacción puede ser imprevisible. Este caso puede englobarse dentro del tipo de explicaciones en las que intervienen las *motivaciones*. No se compra ya tal producto, pero ¿cuáles son las motivaciones que lo han alejado de los clientes? Estas explicaciones son ajenas a la física; aquí los antecedentes, el pasado, no parece afectar al presente y futuro a la manera causal de las ciencias naturales.

5.4. La explicación deductiva nomológica

La explicación cuya estructura lógica obedece al esquema (5.1) de la sección anterior, se dice de tipo *deductivo-nomológico* (D-N), pues realiza una subsunción del *explanandum* bajo principios que tienen el carácter de leyes generales (de ahí su nombre, nomos = regla). Una explicación D-N responde a la pregunta ¿por qué se produjo el fenómeno especificado en el *explanandum*? Y muestra que dicho fenómeno resultó de ciertas circunstancias $C_1, \dots, C_k$, de acuerdo con ciertas leyes $L_1, \dots, L_r$. La cosa era de esperar y la explicación nos permite ver por qué se produjo el resultado. Así, en una explicación D-N, el *explanandum* es una consecuencia lógica del *explanans*.

Es posible que las leyes teóricas no se cumplan exactamente, como la ley de Galileo sobre la caída libre sobre la tierra, al no ser la tierra una esfera perfecta. En general una explicación basada en

principios teóricos ampliará y profundizará nuestra comprensión de los fenómenos empíricos a los que se refiere. La teoría abarca siempre un ámbito superior al de las leyes empíricas preestablecidas a las que obedecen los hechos. Además, las generalizaciones aceptadas antes como enunciados correctos de las regularidades empíricas, aparecerán luego como aproximaciones de ciertos enunciados de leyes implicados por la teoría explicativa, que tiene validez dentro de cierto ámbito.

Cuando una teoría es superada por otra, ésta suele tener un ámbito explicativo más amplio que aquélla a la que sustituye. Piénsese en la teoría de la relatividad de Einstein, sustituta de la teoría de Newton.

No todas las argumentaciones deductivas, con enunciados generales entre sus premisas esenciales, se pueden calificar como explicaciones. El problema de la caracterización de la forma lógica de las explicaciones D-N aceptables ha resultado sorprendentemente dificultoso. Todas las soluciones propuestas hasta ahora han demostrado ser, pronto o tarde, o demasiado restrictivas o demasiado inclusivas o ambas cosas a la vez. Cabe citar las soluciones debidas a Hempel y Oppenheim, Gärdenfors²¹ y Tuomela²².

El esquema (5.1) puede generalizarse de varios modos. En primer lugar, el enunciado E puede a su vez ser una generalización o una ley. En segundo lugar, la relación entre *explanans* y *explanandum* puede ser inductiva en vez de deductiva. Finalmente, el *explanans* puede contener esencialmente leyes estadísticas. Cuando el *explanandum* es así mismo otra ley estadística, que se deriva deductivamente de las premisas por medio del cálculo de probabilidades, resulta un caso de explicación estadística deductiva. En el caso de explicaciones estadísticas inductivas (explicaciones E-I), por el contrario, el *explanans* confiere sólo un grado de soporte inductivo más o menos alto al *explanandum*.

²¹ P. Gärdenfors, *Relevant and redundancy and deductive explanation*, Philosophy of science, 43, 420-431.

²² R. Tuomela, *Human action and its explanation*, Reidel. Dordrecht, 1977.

5. 5. La explicación estadística

La explicación estadística aparece en muchas formulaciones de las ciencias naturales, y a ella vamos a dedicar una atención especial.

Entendemos por *explicación estadística* toda explicación que haga uso de al menos una ley o principio teórico de forma estadística. En los párrafos siguientes estudiamos la estructura lógica de tales explicaciones. Distinguiremos dos tipos lógicamente diferentes de explicación estadística. Uno de ellos, será denominado explicación estadística deductiva y el otro, explicación estadística inductiva. El primero subsume deductivamente una *regularidad estadística* limitada bajo otras *uniformidades* más amplias; el segundo, subsume inductivamente *hechos particulares* bajo leyes estadísticas.

5.5.1. La explicación estadística deductiva. Se llaman explicaciones estadísticas deductivas, o explicaciones E-D, aquéllas en las que se deduce un enunciado con la forma de una *ley estadística*. La deducción se lleva a cabo por medio de la teoría de la probabilidad estadística. Las probabilidades que figuran en el *explanandum* se derivan de las que existen en el *explanans*; éstas pueden tener origen frecuencial o ser afirmadas *a priori* hipotéticamente²³.

Pondremos un ejemplo tomado de Hempel²⁴. Consideremos el caso de la llamada *falacia del jugador*. Se supone que, cuando varios lanzamientos de una moneda correcta han dado caras, la probabilidad de que en el siguiente lanzamiento salga cruz es mayor que la probabilidad de que salga cara. Puede explicarse que esto no es así en base a dos hipótesis que tienen la forma de *leyes estadísticas*. La primera es que el experimento aleatorio de arrojar una moneda da cara con probabilidad 1/2. La segunda hipótesis es que los resultados de diferentes lanzamientos de la moneda son estadísticamente independientes, de modo que la probabilidad de cualquier sucesión esperada de resultados -tal como dos veces cara, luego cruz, luego cara, luego tres veces cara- es igual al producto de las probabilida-

²³ Para distinguir éstos y otros tipos de probabilidad puede consultarse: S. Gutiérrez Cabria, *Filosofía de la probabilidad*, Tirant lo Blanc (Valencia 1992).

²⁴ C. G. Hempel, *La explicación científica* (*op. cit.*)

des de los resultados aislados constituyentes. Estas dos hipótesis, basadas en probabilidades estadísticas, implican *deductivamente* que la probabilidad de que salga cara, después de una larga sucesión de caras, es aún $1/2$.

Muchas explicaciones estadísticas de la ciencia tienen este mismo carácter deductivo. Tal ocurre con las leyes de desintegración radiactiva. La deducción es a veces complicada matemáticamente.

5.5.2. La explicación estadística inductiva. En el caso de explicaciones estadísticas inductivas (E-I), el *explanans* confiere sólo un grado más o menos elevado de soporte inductivo al *explanandum*.

Ejemplo. Juan se recuperó de una infección de estreptococos porque se le administró penicilina, ya que sabemos que la penicilina cura esta infección en un alto porcentaje.

Si es G el suceso "curar" y F el suceso "inyectar penicilina", G/F sería el suceso "curar con la condición de haber sido inyectado con penicilina". Este suceso tendrá una probabilidad condicionada $P(G/F) = r$. Con estas notaciones, el razonamiento anterior puede esquematizarse de acuerdo con el siguiente silogismo estadístico:

$P(G/F)$ es alta;

F_a

Es prácticamente cierto que G_a .

Con F_a y G_a se designan casos concretos de F y G, respectivamente.

Puede ocurrir que en Juan concurren circunstancias especiales (como superar la edad de 70 años) que modifiquen la premisa mayor $P(G/F)$. Por eso Hempel arguyó que el anterior esquema no era satisfactorio, contenía inconsistencias.

Debido a la ambigüedad de esta explicación estadística, propuso la siguiente *formulación inductiva* en vez del argumento con apariencia deductiva de (5.2).

De modo más general las explicaciones E-I pueden esquematizarse así:

$P(G/F)$ es alta;

F_a

===== $[r]$

G_a

Aquí, en la premisa mayor, **P** es una probabilidad estadística mientras que la **r** entre corchetes es una probabilidad inductiva del *explanandum* dado el *explanans*. Con la doble raya significamos que el argumento es de naturaleza inductiva.

La premisa mayor de (5.3) es una ley estadística. Según Hempel la probabilidad **P** puede interpretarse como una frecuencia a largo plazo (un límite frecuencial), o como una probabilidad disposicional o “propensión” según la definición de Popper. La probabilidad $[r]$ es lógica o subjetiva en el sentido de Keynes o Carnap²⁵.

El problema de la ambigüedad en la explicación estadística fue analizado con cuidado por Hempel. Ideó primero un criterio basado en la *total evidencia*, que supone emplear la clase de referencia más restringida a la cual nuestra información total asigna (en nuestro ejemplo) la enfermedad de Juan. Si Juan, elegido al azar, a más de tener edad superior a los 70 años, tiene una cepa de estreptococos resistente a la penicilina, la probabilidad de recuperación será pequeña y la de no recuperación, grande. Si los pacientes tratados por penicilina quedan reducidos a los que no tienen cepas de estreptococos resistentes a la penicilina, la premisa mayor no es ya F sino F_1 , y la evidencia de la premisa mayor ha aumentado; en consecuencia, la conclusión es más probable. Más tarde revisó este criterio y formuló el que denominó *Requerimiento de Máxima Especificidad*.

Peirce²⁶ propuso una teoría detallada de la *explicación probabilística* desarrollando de un modo general los silogismos aristotélicos. En el razonamiento resultante, la *mayor* es cierta, la *menor* sólo

²⁵ Para más detalles sobre estos tipos de interpretaciones de la probabilidad puede consultarse nuestra obra reseñada en la nota 27.

²⁶ Op. cit.

probable y la *conclusión* tiene la misma probabilidad que la menor. Según Peirce es algo más que un silogismo; es una de las tres formas de razonar, junto con la deducción y la inducción. El razonamiento *abductivo* es de este tipo:

Una proporción **p** de los A son B;

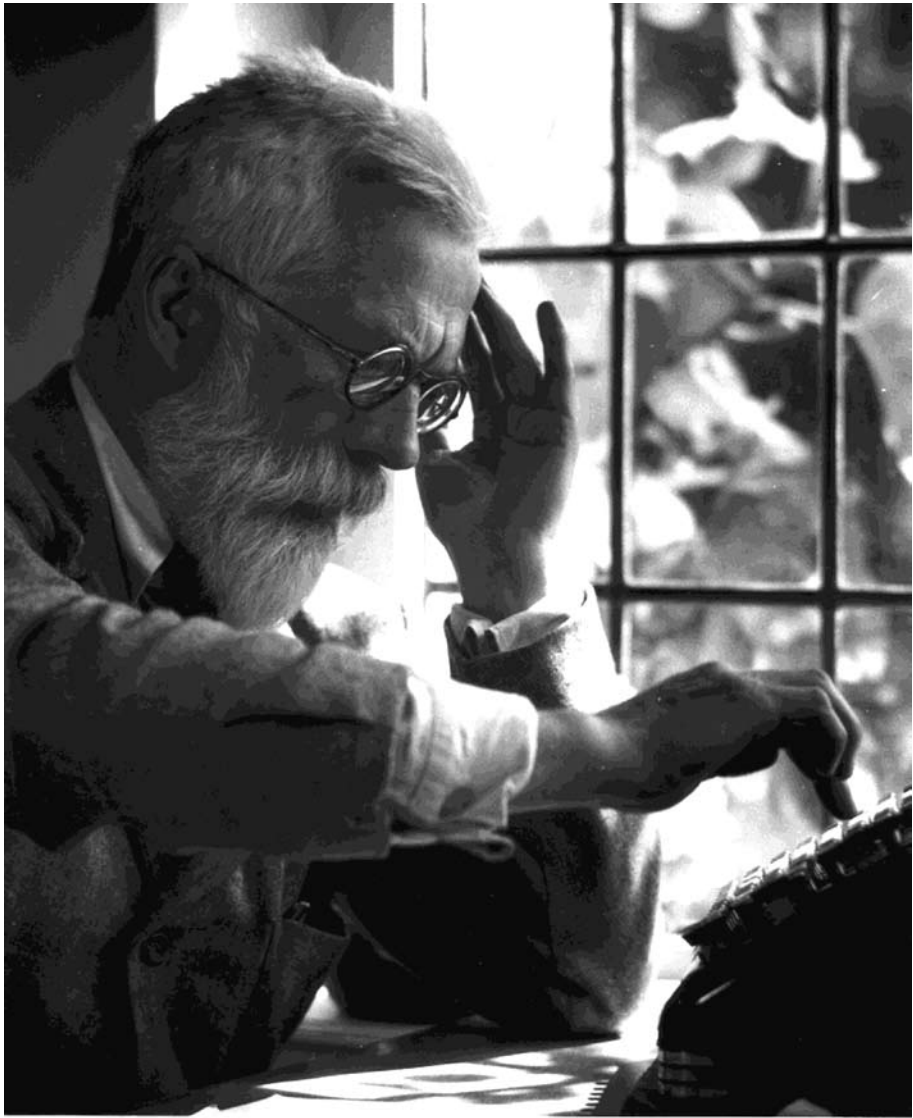
S es un A;

----- (5.4)

Síguese que S es un B con probabilidad **p**,

donde S es un elemento extraído al azar entre los A.

Una diferencia entre el argumento inductivo (5.3) y el modelo deductivo (5.4) de Peirce es la interpretación de la probabilidad **r** entre corchetes. Para Peirce es de naturaleza *frecuencial* y para Hempel es *lógica* o *subjetiva*.



Ronald Aylmer Fisher

6. La predicción

6.1. Predicción y explicación

Varias discusiones recientes de la explicación se han centrado en el problema de distinguir entre explicación y predicción. En su artículo clásico *Studies in the logic of explanation*²⁷ Hempel y Oppenheim afirman que *se aplica el mismo análisis formal, [...] a la predicción que a la explicación. La diferencia entre las dos es de carácter pragmático*. Esta aseveración de que explicación y predicción tienen la misma estructura se conoce con el nombre de *Tesis de identidad estructural*.

Esta tesis ha sido criticada por diversos autores y por varias razones, dando lugar a una controversia atribuible quizá a confusión de índole semántica. Si la predicción se construye tan laxamente que mi anuncio, por ejemplo, de que el mundo acabará con el siglo XXI (anuncio sin ninguna base) se considera como predicción, la tesis es evidentemente falsa. Pero si se estipula de antemano que un anuncio o previsión no es una predicción, salvo que se pueda considerar, pasados los hechos, como una explicación, y, recíprocamente, que una explicación propuesta no sea válida a menos que pueda ser utilizada como predicción antes de los hechos, entonces la tesis es una proposición trivial.

Con todo, entre estos dos extremos se hallan cuestiones de controversia interesantes que no son del todo semánticas, esto es,

²⁷ C. G. Hempel y P. Oppenheim, *Studies in the logic of explanation*, Philosophy of Science, 15, 135-175, 1948.

que no resultan simplemente de los distintos significados asignados por los autores a los términos. En todo caso, no hay consenso en el empleo de las palabras *explicación* y *predicción*. Pensamos, con todo, que la tesis de identidad estructural se cumple en extensas áreas en las que se usan ampliamente las matemáticas y los métodos estadísticos, aunque pertenezcan a la investigación social, por lo que sería admitida por los estudiosos de estas áreas. En estas ciencias, la inferencia predictiva juega un papel más fundamental que la explicación; lo contrario de lo que ocurre con las ciencias físicas, donde la explicación aparece como básica, al menos a nivel teórico.

6.2. Estructura lógica de la predicción

En el lenguaje corriente cualquier declaración acerca de los acontecimientos futuros cuenta como una predicción y, al lado de su éxito o fracaso *post factum*, habría pocos criterios universalmente aceptados para separar *predicciones razonables* de las no razonables. En la ciencia, las cosas son distintas. Mientras los medios de comunicación publican con frecuencia predicciones sin soporte evidencial, o sin argumentación aceptable, como que “se está llegando al fin de los tiempos”, las revistas científicas hacen aseveraciones que exigen soporte objetivo respecto al porvenir.

De modo general, la evidencia que sirve de soporte a una predicción científica consta de dos clases de enunciados: *descripciones de condiciones iniciales* y *leyes generales de naturaleza determinista o estocástica*. A este respecto, la predicción parece acomodarse al modelo de explicación de Hempel. Así, si un estudioso teórico predice que con probabilidad **p** los sujetos humanos exhiben la respuesta **r** cuando son expuestos al estímulo **s**, típicamente justifica su predicción, al menos en términos vagos, en base a consideraciones teóricas, además de puntualizar las condiciones iniciales.

Puede suceder que las condiciones iniciales den una evidencia que provea de base adecuada para una predicción científica aceptable. Esta posibilidad puede ilustrarse con este ejemplo. Consideremos un experimento en el que se pregunta a un individuo que adivine

cuál de dos sucesos luz (roja o verde) aparecerá en cada una de n pruebas; en cada prueba el sujeto registra su conjetura presionando un botón apropiado (rojo o verde); así, su respuesta total r es una sucesión de presiones de botones. La sucesión de colores de las luces representa estímulos para las respuestas del sujeto prueba a prueba. El total de estímulos s representa las condiciones iniciales de la predicción, y es una sucesión de luces rojas o verdes. Si es ahora s' una sucesión especificada de luces estímulo y r' una sucesión especificada de respuestas (presiones de botones), consideremos la siguiente predicción:

*Con probabilidad p el estímulo s' producirá la respuesta r' ,
o en símbolos, $P(r'/s') = p$.*

El enunciado parece ser una legítima predicción que implica condiciones iniciales, pero, al menos a primera vista, no implica consideraciones teóricas. No aparece de forma explícita una ley que la reacción del individuo en cada prueba frente a los estímulos en las pruebas previas. Sin embargo, expresa una regularidad uniforme entre s' y r' .

Hemos de advertir que no se refiere al resultado de un experimento específico; el significado de la predicción es que el estímulo s' , *siempre que ocurra bajo condiciones apropiadas*, dará lugar a la respuesta r' con probabilidad p .

La predicción en las ciencias empíricas se caracteriza por el hecho de referirse a experimentos genéricos, experimentos que pueden ser *replicados* por distintos experimentadores bajo diferentes condiciones de laboratorio. Es esta posibilidad de replicación lo que permite considerar de manera frecuentista las observaciones de un experimento. En consecuencia, el fin de una predicción, su alcance, no se limita al resultado del experimento específico relativo a Juan en determinado laboratorio. Va más allá, se proyecta hacia toda replicación específica del experimento genérico, sin tener en cuenta las circunstancias *accidentales* bajo las cuales es realizado. Esta

característica de la predicción se pone de manifiesto en la siguiente *Condición de consistencia predictiva*.

Si se predice sobre la base de la evidencia s que ocurrirá el suceso r con probabilidad p , se está conminando a proyectar r con probabilidad p , bajo cualesquiera circunstancias en las que la evidencia del enunciado s es verdadera. En particular, la predicción de que s y r están uniformemente asociados le conmina a uno a proyectar r en cada ocasión en que s es realizado.

La palabra proyectar se entiende aquí, y en lo sucesivo, en el sentido de predecir, según nomenclatura hoy muy en uso.

Por su naturaleza las predicciones se extienden, pues, a un *potencial infinito* de observaciones. En el análisis de la lógica de la predicción, somos conducidos de modo natural al problema de la *replicación*.

6.3. La explicación estadística en las ciencias

La predicción estadística afecta a las ciencias sociales de modo especial. La predicción menos precisa es la mera *enumeración de posibilidades* de un suceso: esta predicción -o mejor proyección- da lugar a un *árbol* de alternativas. Un paso más en la predicción se andará cuando se precisen las probabilidades de obtención de cada posibilidad. Esta asignación de probabilidades a cada rama del árbol puede hacerse por vía experimental o por vía lógica. En todo caso, las probabilidades han de estar relacionadas por el cálculo de probabilidades. Se obtiene así una proyección *estocástica*. La mayor parte de las transiciones en las teorías cuánticas son predicciones estocásticas.

La predicción será *individual* si se refiere a un individuo y *colectiva* si afecta a un agregado. Un agregado puede constituir un individuo de nivel superior. La base de una proyección puede ser una ley estocástica o no estocástica; depende del conocimiento que se tenga y de los objetos de la proyección. Así, la proyección sobre un *quantum* de luz es probabilística; pero un agregado de *quanta* de luz

será proyectable en base a macroleyes clásicas, que surgen de las microestructuras de los fotones. Análoga consideración puede hacerse en las proyecciones que atañen a la teoría cinética de los gases.

Las predicciones estadísticas más sencillas son las que se refieren a los comportamientos de una sociedad estable, siempre que se basen en muestras aleatorias representativas de la población. Otro caso interesante es el de las predicciones de los psicólogos, como el ya citado de predicción de respuestas en base a estímulos conocidos. Una tercera posibilidad, pero de *retrodicción*, la ofrecen los estudios paleontológicos: predicción de características de una población extinguida, que se considera antepasada de otra actual en la que se estudian esas características.

Las predicciones estadísticas más interesantes están ligadas a modelos: de regresión, de la coyuntura económica o social, de la evolución de las especies, de la mecánica estadística y de la mecánica cuántica, etc. En todos estos modelos hay una *tendencia general*, que puede ser de naturaleza determinista, y fluctuaciones de azar.

Para que tengan carácter científico, las predicciones y retrodicciones han de satisfacer ciertos requisitos que las distingan de las conjeturas, profecías o pronósticos corrientes. Los modelos predictivos, para ser científicos, tienen que traducirse en fórmulas proyectivas que cumplan esos requisitos.

Las fórmulas predictivas han de cumplir estas condiciones: deben depender esencialmente de los hechos que sirven de base a la predicción y ser precisas. Si falta precisión se da entrada a distintas interpretaciones. Han de tener alto contenido informativo y gran poder de comprobación o contraste. Todo esto implica que se debe poder reconocer el hecho proyectado con toda claridad.

Por otra parte, ha de quedar definida la clase a la que pertenece el hecho y las condiciones en que se realiza o las leyes en las que se apoya ese hecho. Estas condiciones han de valorarse, en cuanto sea posible, mediante medidas cuantitativas. Deberá también estimarse el tiempo en que se espera ocurra el hecho proyectado.

La valoración de todas estas circunstancias permitirá emitir un juicio acerca del valor predictivo de una proposición, acerca de la *potencia* de la predicción formulada. Cuando la proposición proyectiva sobresale en el cumplimiento de esas condiciones se dice que posee un gran *contenido proyectivo*. Este contenido es máximo en las proyecciones cuantitativas y mínimo en los oráculos y profecías. Se han hecho varias propuestas para medir el contenido proyectivo, basadas en el concepto de probabilidad, y fundándose en que las proyecciones mejores son las que se cumplirán más probablemente. El problema radica en medir esta probabilidad.

6.4. Algunos ejemplos de predicción científica

Uno de los rasgos más sobresalientes de la ciencia es su capacidad de ofrecer un cierto saber acerca del futuro: la posibilidad de realizar predicciones. La predicción científica, además de hacer posible el viejo sueño de conocer anticipadamente lo que aún no se ha producido, proporciona también la posibilidad de someter a examen las teorías a partir de las cuales se ofrece ese conocimiento. En el año 1682 el astrónomo inglés Edmund Halley, un buen amigo de Newton y conocedor de su teoría, observó la presencia de un cometa brillante en el cielo y se dispuso a calcular su órbita. No le resultó fácil y trabajó en ello durante mucho tiempo. Recogió también los datos y comentarios que encontró acerca de dos docenas de cometas que ya habían mencionado otros astrónomos anteriormente. Estudió la cambiante posición estelar de estos y pudo advertir que el cometa de 1706, que Kepler había observado escrupulosamente, había recorrido el mismo segmento estelar que el cometa de 1682. El cometa de 1531 observado por Pracastoro y Apiano, había recorrido también aquella parte del cielo, al igual que el cometa de 1456, estudiado por Regiomontano. Descubrió que había un espacio de 75 o 76 años entre cada uno de ellos y llegó a la convicción de que eran el mismo cometa. En 1705, habiendo hecho todos los cálculos, afirmó que el cometa de 1682 volvería a presentarse en el año 1758. Llegó el año 1758 y pasaron los meses sin que apareciese el cometa. Sólo

en noviembre de 1758 un acomodado terrateniente alemán llamado Johann Georg Palitzsch, que conocía la obra de Halley, preparó su telescopio y se puso a observar. Con paciencia esperó hasta el 25 de diciembre, fecha en la cual fue el primero en detectar el cometa que estaba de vuelta. Lamentablemente Halley había muerto en 1742, sin que alcanzara a gozar su triunfo.

Otro ejemplo bastante conocido se refiere a Einstein. La teoría gravitatoria de Einstein llevaba a la conclusión de que la luz debía sufrir la atracción de los cuerpos de gran masa (como el Sol), precisamente de la misma manera en que son atraídos los cuerpos materiales. Como consecuencia de esto, podía calcularse que la luz de una estrella fija distante, cuya posición aparente es cercana al Sol, llegaría a la tierra desde una dirección tal que la estrella daría la impresión de haberse desplazado un poco con respecto al Sol: en otras palabras, parecería como si las estrellas cercanas al Sol se alejaran un poco de éste y una de otra. Puesto que se trata de algo que no puede verse de día porque la luz del Sol hace invisibles esas estrellas, es durante un eclipse cuando puede fotografiarse dicho fenómeno. Si se fotografía la misma constelación de noche, pueden medirse las distancias sobre las dos fotografías y comprobar si se produce el efecto. Esto fue lo que hizo la expedición organizada por Eddington. La predicción se había cumplido y la teoría de Einstein recibía un considerable apoyo.

Predicciones como éstas, nos permiten estar atentos, anticipando medidas, previendo soluciones a determinados problemas. Pero, a la vez, permiten someter a un verdadero test a las teorías. El valor de las predicciones, entonces, es doble. Sin embargo, no todo conocimiento del futuro que la ciencia nos entrega se puede considerar tan claramente como algo positivo. Para examinar esta posibilidad nos podemos referir a los nuevos conocimientos que la genética viene ofreciendo desde hace unos años. Como se sabe, muchas de nuestras características como individuos están contenidas en nuestro material genético. Es en la macromolécula del ADN,

una molécula que tiene la propiedad de autoduplicarse, donde se encuentran codificadas características como el color de los ojos, el color de la piel, la altura que podríamos alcanzar en un determinado medio, etc. Pero también se sabe que algunas enfermedades que desarrollamos en el transcurso de nuestras vidas están también previstas, predeterminadas en nuestro genoma. Uno de los proyectos más ambiciosos en este terreno es el que se conoce como "proyecto genoma", en el que trabajan científicos de diversos países, con la intención de descifrar todo el código genético humano. No hace falta hacer demasiada ciencia-ficción para suponer que en un futuro no muy lejano podamos contar con un conocimiento tal que nos permita anticipar muchas enfermedades que efectivamente dependan de esa codificación genética, antes de que la persona que la sufra alcance a nacer. Bastará tener unas pocas células del embrión para realizar el examen que nos permitirá saber si nuestro futuro hijo desarrollará o no ciertas patologías. Hasta allí el asunto resulta bastante positivo. ¿Cómo no va a ser importante anticiparnos a las enfermedades?

Con todo, esta posible previsión conduce a una nueva situación de la medicina: en vez de tratar con enfermedades ya desarrolladas para revertirlas o paliar sus efectos, se estaría adelantando a la enfermedad, lo que es una ventaja evidente. Pero esa situación contiene algunas dificultades. Podremos conocer muchas de las enfermedades que el embrión o feto puede llegar a desarrollar en el futuro. Muchas serán también las precauciones que se podrán adoptar para que esas enfermedades no lleguen a desarrollarse. Sin embargo, habrá también las patologías que podremos anticipar antes del nacimiento, pero de las cuales desconoceremos el modo de evitarlas.

Los problemas éticos que se derivan de estas previsiones están a la luz del día ya en nuestro tiempo.

La predicción científica es una forma de adelantarse al futuro. Se realiza en virtud de un cierto conocimiento ya tenido. Es sobre la base de ciertas regularidades ya encontradas que el conocimiento científico se aventura a predecir la ocurrencia de ciertos aconteci-

mientos. Apostar, en cambio, que en el futuro podremos contar con la solución a determinadas enfermedades, o que no, se asemeja más a la profecía. Se trata aquí de predecir lo que eventualmente tendremos como conocimiento. Pero no forma parte de la predicción científica afirmar qué conocimientos tendremos en el futuro cuando aún no lo conocemos. Son ejemplos como estos los que nos permiten distinguir no sólo en qué consiste la labor científica, sino que nos dejan en claro cuáles son sus limitaciones. Por último, nos obligan a tomar conciencia de la responsabilidad que tenemos todos de realizar una seria reflexión ética acerca de estos asuntos. La ciencia nos entrega conocimiento, tal vez el mejor conocimiento, pero no podemos esperar de ella las decisiones éticas que sólo nosotros podemos tomar.



G.E.P. Box

7. La modelización

7. 1. Modelos

En ciencias puras y, sobre todo, en ciencias aplicadas, se denomina modelo a una idealización de la realidad utilizada para plantear un problema, normalmente de manera simplificada en términos relativos y contemplada desde un punto de vista matemático, aunque también puede tratarse de un modelo físico. Es una representación conceptual o física de un proceso o sistema (fenómeno), con el fin de analizar su naturaleza, desarrollar o comprobar hipótesis o supuestos y permitir una mejor comprensión del fenómeno real al cual el modelo representa.

Para construir un modelo es necesario plantear una serie de suposiciones, de manera que lo que se quiere representar esté suficientemente plasmado en la idealización, aunque también se busca, normalmente, que sea lo bastante sencillo como para poder ser manipulado y estudiado.

El concepto de modelo ha sido muy debatido estos últimos años. Ha recibido distintas acepciones según el dominio científico cultivado por los tratadistas. Bochenski, un lógico, lo define como un producto físico observable en principio a simple vista, que tiene la forma misma que el objeto o contenido representado en el enunciado científico. Según esta definición, una maqueta de un edificio es un modelo de dicho edificio; una esfera en torno a la cual giran otras más pequeñas, a distancias determinadas, es un modelo de la teoría atómica de Bohr. Tal modelo no es necesario que pueda ser

construido; basta con que sea pensado o imaginado. Cuando se dice de ciertas teorías modernas (por ejemplo, en física) que no tienen modelo, quiere significare que no pueden ser imaginadas, que tenemos de ellas un sentido meramente operacional, pero no eidético. Un signo tiene sentido eidético si sabemos lo que significa; es puramente operacional, si sólo sabemos cómo debe emplearse. Pero puede haber incluso enunciados con sentido eidético y operacional, pero sin posible representación sensible, que corresponden a estructuras visibles intelectualmente, como ocurre con algunas proposiciones de la fenomenología y de la ontología.

Este tipo de modelos es el que más nos interesa aquí: son representaciones formales de ideas o de conocimientos relativos a un fenómeno. Esas ideas, llamadas a menudo teoría del fenómeno, se suelen expresar por un conjunto de hipótesis acerca de los elementos esenciales del fenómeno y de las leyes que lo gobiernan. Se traducen, generalmente, bajo la forma de un sistema matemático. Este sistema, con sus propiedades y relaciones, se llama así mismo modelo (modelo matemático).

Todas las ciencias ideales utilizan modelos. Cada una aísla ciertos fenómenos particulares cuyas leyes básicas examina. A partir de este examen, reduce la complejidad de las situaciones reales y las simplifica, a fin de poder aplicar aquellas pocas leyes que parecen más importantes con relación al problema que se estudia. Este aislamiento de los fenómenos y su representación abstracta es lo que constituye el punto de partida para las etapas explicativa y predictiva del método científico.

El razonamiento basado en el modelo permite explorar las consecuencias lógicas de las hipótesis mantenidas, confrontarlas con los resultados obtenidos por la observación o experimentación y, en su caso, mejorar (o desechar) el modelo, llegando así a conocer mejor la realidad y a obrar con mayor eficacia sobre ella. Los modelos matemáticos permiten utilizar directamente los instrumentos y resultados que proporcionan los matemáticos.

Si representamos con E el resultado de un experimento o sistema generador de respuestas, con $X_1, \dots, X_n$ como variables de entrada, y con $Y_1, \dots, Y_n$ como variables respuesta, no controlables, un modelo matemático típico adopta la forma

$$E = f(X_1, \dots, X_n; Y_1, \dots, Y_n)$$

Los dominios de las variables pueden fijarse mediante una serie de ecuaciones o inecuaciones adicionales.

Los modelos matemáticos se llaman deterministas si se conoce de manera puntual la forma del resultado, ya que no hay incertidumbre.

Probabilísticos: Cuando no se conoce el resultado esperado, sino su probabilidad y existe por tanto incertidumbre, y probabilísticos (o estocásticos) cuando no se conocen los resultados, sino su probabilidad, y existe por tanto incertidumbre.

En la elaboración de un modelo podemos distinguir estas etapas.

1) Localizar un problema del mundo real.

2) Concebir y formular un modelo matemático del problema en cuestión, identificar las variables tanto dependientes como independientes y establecer hipótesis lo suficientemente simples para ser tratadas matemáticamente.

3) Aplicar, los conocimientos matemáticos disponibles para llegar a conclusiones plausibles.

4) Comparar los datos obtenidos a partir del modelo de predicción con datos reales. Si no hay compatibilidad entre los dos grupos de datos, se renuncia al proceso. Se trata, en suma, de una confrontación del mundo de los conceptos con el mundo de los hechos. Cuando hablemos con detalle del modelo estadístico se verá mejor la relación entre estos dos mundos.

7.2. Algunos ejemplos de modelos probabilísticos

Modelo dicotómico, Pensemos en un enfermo. Un modelo de su situación (mundo real) puede ser el siguiente: hay dos estados posi-

bles, curar o no curar, a los que podemos asignar las probabilidades p y $1-p = q$. Podemos suponer que este paciente representa a toda una población de pacientes que sufren la misma enfermedad, en cuyo caso el modelo servirá de norma para dictaminar de cara al futuro. La determinación del parámetro p se hará en base a la frecuencia relativa de curados en una muestra de enfermos. Al dar a p un valor numérico hemos ajustado el modelo a los datos de la muestra.

Modelo binomial. La situación real puede ser la indagación del número de varones en una población valenciana de 20.000 habitantes. Se sabe, por el registro de Nacimientos, que la probabilidad de nacer varón es de 0,517 en la provincia de Valencia. Hay dos estados posibles, ser varón o ser hembra; ambas posibilidades son aleatorias, incompatibles e independientes. Luego la situación definida cumple las condiciones de un modelo binomial de parámetros $n=20.000$ y $p=0,517$. El valor esperado sabemos que es np ; en este caso, $20.000 \times 0,517 = 10.340$ varones.

Modelo de Poisson. Se estudia el número de erratas de imprenta en un libro, en intervalos de una página. Las erratas que ocurren en un determinado trozo de texto son independientes de las que ocurren en otro trozo distinto cualquiera y dependen del azar. La probabilidad de que en una palabra haya una errata es pequeña. Estas hipótesis se amoldan al modelo de Poisson, el cual queda perfectamente determinado por un parámetro simple, su media, que es el número promedio de erratas por página.

Modelo normal. Poseemos las puntuaciones de los alumnos de una asignatura y deseamos, por ejemplo, conocer el percentil correspondiente a un alumno que ha sacado una nota determinada. En vez de trabajar con todas las puntuaciones (que pueden ser muchas), podemos suponer que éstas siguen una distribución normal. El modelo normal está completamente determinado por la media y la desviación típica. Obtenidas estas características con respecto a todas las puntuaciones, la tabla del modelo normal resuelve el problema planteado.

El modelo incorpora a la situación real una estructura con escasos elementos desconocidos, los parámetros: la probabilidad en el caso dicotómico, el número de individuos y la probabilidad de ocurrencia para cada uno en el caso binomial, la media en el modelo de Poisson, la media y la varianza en el caso normal. El modelo probabilístico es pieza fundamental en los dos principales argumentos estadísticos, la deducción progresiva y la reducción regresiva, como vamos a ver a continuación.

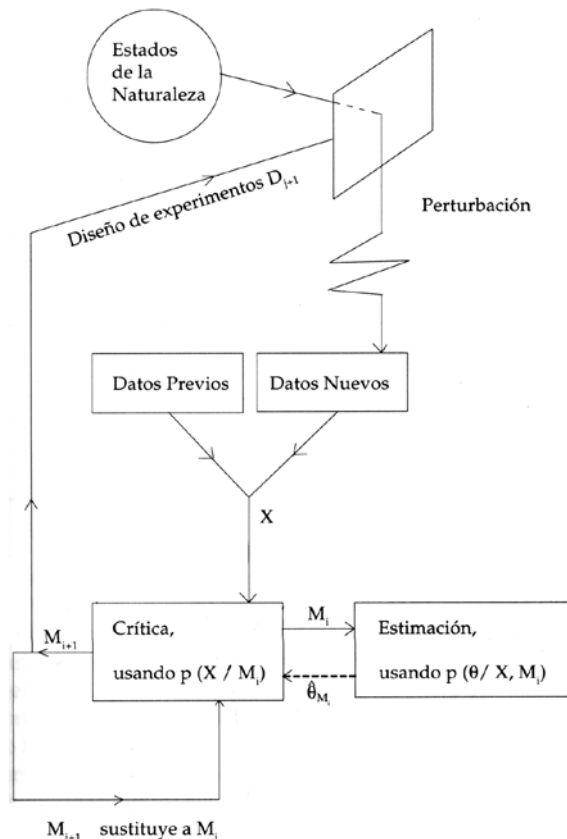
7. 3. El modelo estadístico

Para la investigación estadística el modelo tradicional es una clase de distribuciones de probabilidad de un vector aleatorio, y el fin perseguido consiste en obtener la distribución que describa más exactamente el sistema objeto de la investigación. Se trata de un sistema estable o bajo control estadístico, esto es, aquél en que cada serie de entradas da lugar a respuestas que obedecen a distribuciones de probabilidad.

Hemos de distinguir entre el objetivo primario del modelo en probabilidad aplicada y en estadística. En probabilidad aplicada los objetivos del modelo son el estudio, explicación o predicción, mediante teoría o simulación, de las propiedades o comportamiento del sistema. En estadística, el objetivo primario es la inferencia, con el fin específico de indagar en qué medida los datos observados son compatibles con las distintas alternativas.

Un modelo estadístico presenta dos aspectos principales: uno estructural, que concierne a la interpretación concreta del modelo en términos de los hechos y de las teorías relevantes; otro estocástico, que se refiere esencialmente a la representación abstracta de la variabilidad del muestreo, definida por distribuciones de probabilidad. Estas distribuciones suelen acaecer en contextos que implican el empleo deliberado de diseños aleatorizados o la elección aleatoria de las muestras. Los análisis basados en la estadística descriptiva y en muchos estudios exploratorios de datos, no apelan necesariamente a asunciones estocásticas.

Suponemos que los datos proceden de un experimento, pero también pueden provenir de otras muchas fuentes. Nuevo conocimiento emerge del proceso dual de la inducción y de la deducción, como aparece en el gráfico que fue ya explicado al describir el método hipotético-deductivo.



El estadístico simplemente ayuda a esta evolución del proceso, mediante el cual se lleva a cabo el conocimiento científico. Nuevos hechos (datos) sugieren probar nuevas teorías o modelos que, a su vez, requieren nuevos análisis de datos y nuevos experimentos. Su labor es doble: crítica o depuración de los modelos y estimación. Esta doble misión de la estadística en el desarrollo científico puede expresarse mediante el siguiente gráfico, cuya idea inicial es de Box¹.

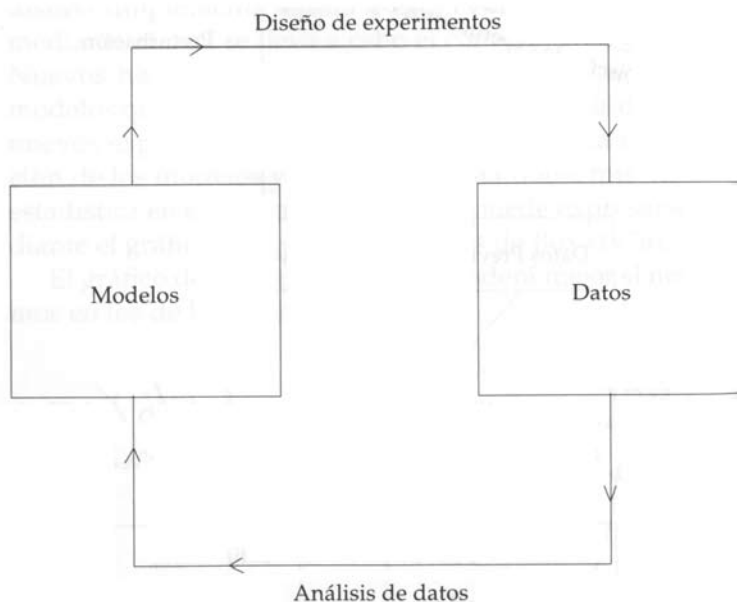
¹ G. E. P. Box, *Science and statistics*, Jour. Of the Amer. Statist. Association, vol. 71, n° 359 (Applications Section).

El vector aleatorio X contiene los datos de la muestra. Los valores del vector aleatorio θ determinan la distribución de probabilidad desconocida, y están contenidos en el espacio paramétrico, que corresponde a la clase de distribuciones de probabilidad admisibles.

Con $p(X/M_i)$ representamos la distribución muestral que sirve para la estimación de los parámetros de la distribución paramétrica $p(\theta/X, M_i)$, siempre en relación con el modelo M_i . El estudio empieza por la consideración de los estados de la naturaleza de los que se extrae siempre el mundo de los datos de investigación. El proceso que señalan las flechas del gráfico es el descrito con anterioridad: diseño de experimentos, construcción de modelo, etc. Con θ^* representamos la estimación del parámetro θ .

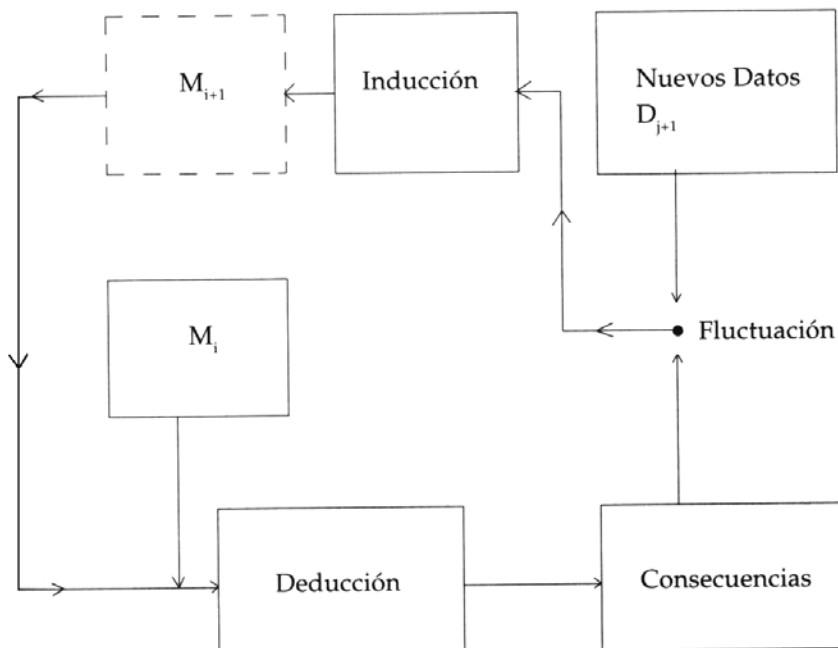
Este gráfico se entenderá mejor si nos fijamos en los dos siguientes.

En el primero se pone de manifiesto el círculo que se establece entre datos y modelos.



Las flechas van de los datos a los modelos mediante un análisis de datos, y del modelo a los datos por un diseño de experimentos.

En el siguiente se expresan más explícitamente estas relaciones, datos-modelos, y la doble explicación inductiva y deductiva (hipotético-deducción).



La crítica o depuración implica confrontar el modelo M_i con los datos X disponibles y cuestionarse si M_i es conforme con X , y, en caso de desacuerdo, por qué existe esa disconformidad. Es, pues, un proceso de diagnóstico, para el cual se emplean diversas técnicas, tomadas predominantemente de la estadística clásica, como tests para medir la bondad de un ajuste, cálculo de la varianza residual, etc. Si no hay conformidad entre el modelo y los datos debe pensarse en un nuevo modelo M_{i+1} . La confrontación del nuevo modelo puede hacerse con los datos que ya se tenían, pero además se deberá acudir a nuevos datos generados por un nuevo diseño de experimentos D_{j+1} . Éste será elegido de modo que queden aclaradas regiones oscuras

del problema, que se consideran importantes para obtener, a la vista de la modificación del modelo, la adecuada verificación independiente del mismo.

Cuando el proceso descrito conduce a un modelo verificable, esto es, cuando se comprueba que puede constituir una buena aproximación a la realidad, se puede llevar a cabo la estimación de los parámetros (volvemos ahora al gráfico de la página 100), que condiciona la verdad de su conformidad con la realidad. Esta fase del proceso habrá que realizarla después de cada tentativa de nuevo modelo, y no sólo con respecto al modelo definitivo. La razón está en que la depuración de un modelo implica estimar provisionalmente sus parámetros en las etapas intermedias.

La certera elección de los modelos en las etapas, que han de converger lo más rápidamente al modelo final, es lo que distingue a los buenos científicos y a los buenos estadísticos de los malos. Es en este contexto en el que deben contemplarse las teorías de inferencia, al margen de la escuela a la que pertenezcan. Más información sobre la inferencia estadística puede verse en nuestra Filosofía de la estadística² o en cualquier tratado de estadística matemática. Las diferentes ciencias utilizan modelos estadísticos adaptados a sus necesidades, que se estudian, por ejemplo, en la psicometría, la sociometría la econometría, etc.

Vamos a fijarnos, como ejemplo ilustrativo, en el caso de la econometría.

Los modelos más típicos que construye son lineales y se expresan por ecuaciones de primer grado. Contienen en el segundo miembro de la ecuación variables independientes (en el caso más sencillo) y una variable aleatoria (variable de perturbación) que recoge la diferencia, el desajuste, existente, entre el modelo y la realidad. No olvidemos que el modelo es una representación simplificada de la realidad. Esta variable recoge dos tipos de variación: la que existe entre el modelo

² S. Gutiérrez Cabria, *Filosofía de la estadística*, Universitat de Valencia, Servicio de Publicaciones, 1994.

y el mundo real (error en las ecuaciones) y la debida a los errores en las observaciones. Esta variable es aleatoria y, en consecuencia, la variable dependiente, la del primer miembro de la ecuación, es también aleatoria. Por todo esto, los modelos econométricos son estocásticos.

