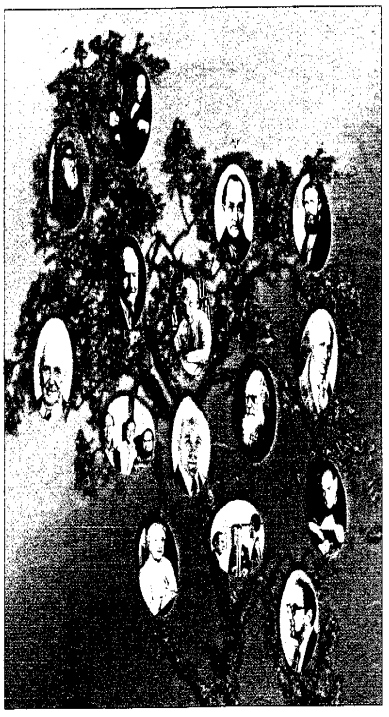

La ciencia se mueve, cambia de lugar, se agita. Es veleidosa y frágil. Por dentro y por fuera, se transforma. Está tan viva como un ejemplar de una especie, libre o en cautiverio, que muestra facetas desconocidas aun para los mismos que, en apariencia, la elaboran con absoluto control, y se les escapa, huye. Y luego se queda quieta, inmóvil, camuflada, a la espera, como si supiera que una infinidad de miradas la acechan, pendientes de ella, para aprehenderla. Los científicos saben todo esto y saben también que la certeza absoluta no es inherente al método científico, no es infalible; avanza cuando unos científicos refutan teorías de otros científicos, o de sí mismos al reconocer equivocaciones, y entonces aquel adquiere uno de sus rasgos más significativos, el lado humano, en el momento en que hace que la ciencia avance, socializada por vía del lenguaje. He aquí el tema central de esta obra de Ruiz y Ayala: a la ciencia se la puede estudiar y comprender de igual modo que como han procedido las epistemologías evolucionistas, sólo que en este caso no son los entes vivos la unidad de conocimiento, sino los conceptos y las teorías, en su origen, devenir y futuro, partiendo de la idea de que todo proceso que involucra variación y selección puede ser explicado en términos darwinistas, aunque por supuesto, en la aproximación de este problema es necesario adecuar el darwinismo a la teorización de carácter social, ya que los primeros darwinistas también pensaron que su paradigma era tan general que podía extenderse a toda entidad cambiante. Así, las maneras discrepantes en que varias teorías tratan de dar cuenta de determinado problema ecíficamente el del desarrollo de la ciencia, con sus cont nicas- se analizan en estas páginas en las que ortante de los autores es estimular el interés nocer sus fundamentos, identificar lo que y definir sus límites.

FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Rosaura Ruiz / Francisco J. Ayala EL MÉTODO EN LAS CIENCIAS

Rosaura Ruiz / Francisco J. Ayala

EL MÉTODO EN LAS CIENCIAS

Epistemología y darwinismo

Primera edición, 1998
Segunda reimpresión, 2004

Ruiz Gutiérrez, Rosaura y Francisco J. Ayala
El método en las ciencias. Epistemología y darwinismo / Rosaura Ruiz, Francisco J. Ayala. — México : FCE, 1998
216 p. ; 23 × 14 cm — (Colec. Ciencia y Tecnología)
ISBN 968-16-5575-3

1. Ciencia — Teoría 2. Epistemología I. Ayala, Francisco J., coaut. II. Ser III. t

LC Q175 R75 Dewey 500 R677m

Comentarios y sugerencias: editor@fce.com.mx
www.fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55)5227-4672 Fax (55)5227-4694

D. R. © 1998, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D. F.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra
—incluido el diseño tipográfico y de portada—,
sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico,
sin el consentimiento por escrito del editor.

ISBN 968-16-5575-3

Impreso en México • *Printed in Mexico*

Prólogo

Este libro aborda cuestiones epistemológicas: cómo se adquiere y se justifica el conocimiento científico. La epistemología analiza de qué manera los científicos se plantean problemas y las formas en que los resuelven, los cambian o los abandonan.

El asunto es importante puesto que ningún otro modo de conocimiento (filosofía, literatura, arte, religión) afecta la vida social y económica de la humanidad moderna de manera tan radical y universal como la ciencia. Los grandes avances tecnológicos y médicos —que han sentado las bases para un desarrollo económico y social en que la humanidad podría incrementar todas sus potencialidades, pero que al mismo tiempo posibilitan la destrucción de la naturaleza, incluida nuestra especie— derivan todos ellos de la ciencia, una manera de investigar el Universo que ha florecido sólo en los tres últimos siglos (que representan menos de una milésima de la existencia de nuestra especie *Homo sapiens*). ¿Cuáles son las características del conocimiento científico que justifican su validez y dan cuenta de su impacto en nuestra vida?

Las cuestiones epistemológicas son de interés en la práctica científica, puesto que orientan el desarrollo de las teorías y conceptos de las ciencias. El conocimiento del cuerpo teórico de una ciencia es parte integral de la formación en esa ciencia. Tener claridad en los conceptos y teorías de las ciencias implica entenderlas como el conjunto de respuestas que se han dado a los fenómenos naturales y de los métodos con que se han adquirido tales respuestas. Esto permite no sólo comprender el contexto científico general y poder integrar en él los resultados obtenidos, sino también afrontar sistemáticamente los problemas nuevos y las formas de resolverlos.

En los tres primeros capítulos se analizan las nociones de metodología científica que dan sustento a las epistemologías darwinistas que se presentan a partir del capítulo IV.

En el primer capítulo hacemos una descripción del método científico. El conocimiento científico se desarrolla como un diálogo entre dos etapas entrelazadas, una imaginativa y otra crítica. Una etapa consiste en la creación de

hipótesis o teorías; la otra etapa en la contrastación de esas teorías. Este diálogo implica que, con frecuencia, estructuras teóricas previamente aceptadas son luego rechazadas y sustituidas por otras. El experimento y la observación desempeñan un papel decisivo en este caso: una hipótesis es aceptada por los científicos en tanto que la observación o la experimentación no logren desmentirla. Ninguna proposición teórica puede, pues, reclamar para sí ser verdad absoluta y definitiva. Toda teoría es sólo provisionalmente verdadera; se encuentra en espera de alguna prueba que la desmienta y que ponga de relieve un conocimiento más verdadero o más preciso.

En este capítulo se hace una crítica a la propuesta de que el inductivismo sea un modo válido del conocimiento científico. Primero, porque un conocimiento inductivo tendría que validarse por un número infinito de observaciones; segundo, porque la inducción de por sí es ajena a ser interpretada, pero toda observación depende de concepciones previas. Por ello, la correspondencia que la ciencia manifiesta no es entre enunciados y hechos, sino entre enunciados y hechos interpretados; lo que se contrasta son las diferentes interpretaciones de la realidad, es decir, se contrastan teorías con teorías y teorías con observaciones cargadas de teoría.

Aunque rechazamos el inductivismo como modo válido de justificar conocimientos científicos, sostenemos que una teoría es aceptada o rechazada con base en observaciones y experimentos. Un programa de investigación produce teorías científicas válidas sólo si éstas son susceptibles de ser contrastadas por la experiencia. Tal como dice Karl Popper, el criterio de demarcación del conocimiento científico no es el de la verificabilidad, sino el de la falsabilidad de las teorías. Claro que no basta con que una teoría sea refutable, sino que es necesario corroborarla: su resistencia a pruebas críticas se transforma en la evidencia que la hace más fuerte.

La objetividad de los enunciados científicos descansa en el hecho de que pueden contrastarse intersubjetivamente. Para que otros científicos puedan poner a prueba nuestras teorías, debemos especificar sus límites, sus prohibiciones. Por lo tanto, una teoría es falsable si existe una clase no vacía de eventos (por lo tanto de enunciados) prohibidos por ella. Tales eventos (observaciones o experimentos) tienen que ser incompatibles con la teoría y excluidos por ella. El contenido empírico de una teoría está basado en los eventos que prohibe. Esto no significa simplemente que la teoría que prohiba más sea la más científica; una teoría necesita "explicar", dar la razón que da cuenta de los sucesos, y tiene que ser predictiva. La predicción puede ser de hechos que vayan a ocurrir en el futuro, pero esto no es esencial. Una teoría científica predice la ocurrencia de hechos o procesos que no son conocidos, aun cuando

Falsar: Verificar una proposición con los hechos para poder refutarla

pueda tratarse de eventos que ocurrieron en el pasado. Ejemplos de esta situación se dan en todas las ciencias, pero son particularmente notables en la evolución y en la astronomía. Los evolucionistas predijeron la existencia de organismos con características comunes a aves y reptiles antes de descubrir a *Archaeopteryx*, un animal que vivió hace millones de años. Los astrónomos predijeron la existencia de Plutón, un planeta que se formó con el resto del sistema solar pero que no se conocía todavía.

En el capítulo II se analizan las ideas de Thomas Kuhn, quien propone que la ciencia no es una actividad de científicos aislados sino de investigadores que comparten una constelación de creencias, valores, métodos y técnicas, que les hace parte de una comunidad científica. Una comunidad científica avanza los conocimientos, pero al mismo tiempo establece las formas de su legitimación. Particularmente polémica es la diferencia defendida por Kuhn entre ciencia normal y ciencia revolucionaria.

En el capítulo III presentamos la concepción de Imre Lakatos. Analizamos su idea de que las comunidades de científicos no producen tanto teorías aisladas como programas de investigación, sistemas de teorías unidos en torno a un núcleo duro o meollo. Es decir, los científicos no sólo presentan una teoría para explicar un fenómeno determinado, sino que además elaboran una serie de teorías secundarias que protegen lo que Lakatos llama el centro firme del programa, que es provisionalmente irrefutable. Lakatos propone que se ignoren las observaciones que aparentemente refutan el núcleo del programa, con el fin de continuar investigando evidencias a su favor. En vez de tratar de refutar el meollo de la teoría, se deben crear "hipótesis auxiliares" que protejan el centro del programa.

El capítulo IV analiza la epistemología evolucionista de Stephen Toulmin. Toulmin propone que la ciencia es un proceso continuo; rechaza la noción de revoluciones científicas. La distinción de Kuhn entre ciencia normal y ciencia revolucionaria es falaz, de manera similar a como no hay solución de continuidad radical entre macroevolución y microevolución, sino que la macroevolución es el resultado acumulado de cambios microevolutivos. Toulmin hace uso heurístico de la comparación entre evolución biológica y evolución conceptual, pero considera que se trata no tanto de una analogía explicativa, sino justificativa. Para Toulmin, el darwinismo es una forma general de explicación histórica, la evolución por variación y selección, que es aplicable a otros procesos.

En el capítulo V discutimos la noción de Popper según la cual tanto los científicos como los organismos tratan de resolver problemas por ensayo y error. Las variaciones genéticas, al igual que las nuevas hipótesis científicas,

son intentos de resolver los problemas planteados, ya sea por la naturaleza o por la ciencia. La selección natural y la selección de teorías son procedimientos de eliminación de errores que actúan tanto descartando las formas sin éxito (selección negativa) como modificándolas gradualmente (selección positiva).

El capítulo VI está dedicado a la epistemología evolutiva de David Hull. De acuerdo con Hull, los científicos forman linajes conceptuales: compiten entre sí para convencer a otros científicos de las virtudes de sus teorías y forman linajes de científicos que comparten ideas. La ciencia avanza gracias a la competencia entre grupos de científicos que intentan a la vez conseguir evidencias a favor de sus puntos de vista y refutar los de otros grupos. Hull cree que el darwinismo puede constituirse en una teoría general capaz de explicar fenómenos muy diversos, en todos los cuales los procesos de selección desempeñan un papel preponderante. Para Hull lo que cuenta no es la "verdad" de una teoría sino el número de sus adeptos. Lo importante para los científicos, como para los organismos, es el número de descendientes que dejan.

Nuestro empeño en las teorías epistemológicas que utilizan de manera heurística la teoría de la evolución se basa en la preponderancia de tales teorías en la filosofía de la ciencia contemporánea, preponderancia debida en buena parte a su originalidad en reconocer los paralelos entre la evolución de los organismos y la evolución del conocimiento científico. Hemos escrito este libro con el propósito de estimular el interés en estas teorías, identificar lo que hay de válido en ellas y definir sus límites.

I. El método en las ciencias

Introducción

El conocimiento deriva de varias fuentes, tales como la experiencia del sentido común, la expresión artística y la reflexión filosófica. El conocimiento científico, sin embargo, se mantiene al margen como algo especial. El gran éxito de la ciencia como una manera de indagar sobre la naturaleza del universo es motivo de admiración. La tecnología derivada del conocimiento científico es igualmente admirable: los rascacielos de nuestras ciudades, cohetes que llevan hombres a la Luna, teléfonos que proporcionan comunicación instantánea entre continentes, computadoras que realizan cálculos complejos en milésimas de segundo, vacunas y drogas que controlan las bacterias parasíticas, terapias génicas que reemplazan DNA en células defectuosas. Todos estos extraordinarios logros brindan testimonio de la validez del conocimiento científico del cual se originan.

El conocimiento científico es también notable en la medida en la que surge por el consenso y acuerdo entre científicos, y por la forma en la que los nuevos conocimientos se desarrollan a partir de descubrimientos anteriores en vez de comenzar nuevamente con cada generación o con cada nuevo científico. Ciertamente los científicos no concuerdan entre sí en muchos puntos; pero éstas son cuestiones aun no establecidas, y los puntos de desacuerdo generalmente no ponen en cuestión el conocimiento previo. Los científicos modernos no ponen en cuestión el que los átomos existan, o el que haya un universo con millones de estrellas, o que la herencia se encuentre contenida en el DNA. Los científicos difieren en este sentido de los filósofos, quienes debaten interminablemente las preguntas que buscan contestar. Los filósofos, hoy en día, se centran en las mismas cuestiones que se debatían en la Antigüedad o en la Edad Media o hace dos décadas, sin nunca llegar a un acuerdo definitivo. No sucede así con los científicos, quienes parten de puntos resueltos en el pasado con el fin de formular nuevas preguntas y resolverlas. Tampoco existe entre los científicos nada como los puntos de vista radicalmente dispares e irreconci-

liables sostenidos por distintas religiones, o los siempre cambiantes modos de la expresión artística.

¿Qué es, entonces, lo que hace al conocimiento científico diferente de todas las otras actividades mediante las cuales aprendemos acerca del universo y de nosotros mismos? En este trabajo abordamos la cuestión identificando primero algunos rasgos distintivos del conocimiento científico. Explicamos a continuación que la ciencia implica mucho más que el simple razonamiento inductivo, y pasamos a proponer el método hipotético-deductivo como un paradigma para entender algunas características distintivas de la manera en la que los científicos proceden en sus esfuerzos para entender el mundo. Más adelante consideramos el problema de la demarcación, o cómo distinguir entre las afirmaciones científicas válidas e inválidas; y discutimos brevemente el papel que desempeñan los mecanismos sociales usados en la práctica científica para distinguir la ciencia válida de la no válida. Utilizamos ejemplos históricos para ilustrar aspectos relevantes de cómo el conocimiento científico se desarrolla y cómo funciona la demarcación en la práctica.

Características distintivas de la ciencia

La ciencia busca la organización sistemática del conocimiento acerca del mundo. El sentido común, como la ciencia, proporciona conocimiento acerca de fenómenos naturales, y este conocimiento es a menudo correcto. Por ejemplo, el sentido común nos dice que un niño se parece a sus padres y que las buenas semillas producen buenas cosechas. El sentido común, sin embargo, muestra poco interés en establecer sistemáticamente conexiones entre fenómenos que no parecen estar evidentemente relacionados. En contraste, la ciencia se interesa por formular leyes generales y teorías que manifiesten patrones de relaciones entre muy distintas clases de fenómenos. La ciencia se desarrolla descubriendo nuevas relaciones, y particularmente integrando afirmaciones, leyes y teorías, que anteriormente parecían no estar relacionadas, en leyes y teorías más comprehensivas.

La ciencia procura explicar *por qué* los sucesos observados de hecho ocurren. Aun cuando el conocimiento adquirido en el curso de la experiencia ordinaria es frecuentemente preciso, rara vez proporciona explicaciones de por qué los fenómenos ocurren de cierta manera. La experiencia práctica nos dice que los niños se parecen a uno de sus padres en ciertos rasgos y a al otro en ciertos otros, o que el abono incrementa la producción de la cosecha. Pero no proporciona explicaciones para estos fenómenos. La ciencia, por otro lado, busca formular explicaciones para los fenómenos naturales identificando las condiciones que hacen posible su ocurrencia.

La búsqueda de la organización sistemática del conocimiento y el propósito de explicar por qué los sucesos son como se observan, son dos características que distinguen a la ciencia del conocimiento de sentido común. Pero estas características son también compartidas por otras formas de conocimiento sistemático, tales como las matemáticas y la filosofía. Una tercera característica de la ciencia, que distingue a las ciencias empíricas de las otras formas sistemáticas del conocimiento, es que las explicaciones deben ser formuladas de tal manera que puedan ser sometidas a pruebas empíricas, proceso que debe incluir la posibilidad de *refutación empírica*. La refutabilidad ha sido propuesta como el criterio de demarcación que diferencia a la ciencia de las demás formas de conocimiento (Popper, 1959).

En ciencia, las nuevas ideas son llamadas hipótesis. Las pruebas a las que las ideas científicas son sometidas, incluyen la contrastación de las hipótesis con el mundo de la experiencia de tal manera que debe dejarse abierta la posibilidad de que se pueda rechazar cualquier hipótesis particular si ésta lleva a predicciones erróneas acerca del mundo de la experiencia. La posibilidad de refutación empírica de una hipótesis se lleva a cabo estableciendo si las predicciones precisas derivadas como consecuencias lógicas de la hipótesis concuerdan con el estado de los hechos encontrados en el mundo empírico. Una hipótesis que no puede ser sometida a la posibilidad de refutación por observación y experimentación no puede ser considerada como científica.

Posteriormente retomaremos esta cuestión de la "refutación empírica" como el criterio de demarcación que separa a la ciencia de otras formas de conocimiento. Por ahora, resumiremos la discusión de la naturaleza de la ciencia definiéndola como "el conocimiento acerca del universo formulado en forma de principios explicativos sostenidos por la observación empírica, y sujetos a la posibilidad de la refutación empírica". Otra definición sería la siguiente: "La ciencia es una exploración del universo material que busca relaciones naturales y ordenadas entre los fenómenos observados y que es autocrítica" (Simpson, 1964, p. 91). Otras definiciones pueden ser propuestas, pero buscar una definición "perfecta" es un esfuerzo vano. La ciencia es una empresa compleja que no puede ser capturada adecuadamente en una sola enunciación. En cualquier caso, nuestro propósito no es tanto proporcionar una definición adecuada sino identificar los rasgos que distinguen al conocimiento científico. Pasaremos primero a discutir "el método inductivo", del cual se dice a veces que es el método seguido por los científicos. Explicaremos que la inducción no es un método por el cual se pueda establecer la validez del conocimiento cien-

tífico (aun cuando es a menudo un proceso por el cual nos encontramos con nuevas ideas, pero esto es un problema distinto).

La inducción en la ciencia

Es una idea común pero falsa la de que la ciencia avanza por "acumulación de hechos experimentales y extrayendo una teoría de ellos" (Jacob, 1988; véase más adelante). Este concepto erróneo está basado en la muy repetida aseveración de que la ciencia es inductiva, noción que se remonta al ensayista y estadista inglés Francis Bacon (1561-1626). Bacon tuvo un papel importante e influyente en los inicios de la ciencia moderna por su crítica a las especulaciones metafísicas propagadas por los filósofos escolásticos medievales. En el siglo XIX el más apasionado y claro proponente del inductivismo fue John Stuart Mill (1806-1873), economista y filósofo inglés.

La inducción fue propuesta por Bacon y Mill como un método para lograr la *objetividad* evitando las preconcepciones subjetivas, y para obtener conocimiento *empírico* en vez de abstracto o metafísico. En su forma extrema, el método inductivo sostendría que un científico debe observar todos los fenómenos que acontezcan en su experiencia, y registrarlos sin ninguna preconcepción sobre qué observar o cuál sea la verdad acerca de ellos; se espera que así emerjan, eventualmente, verdades de validez universal. La metodología propuesta puede ser ejemplificada como sigue. Midiendo y registrando todo lo que se le confronta, un científico observa un árbol con hojas. Observa que un segundo árbol y un tercero, y muchos otros, tienen hojas. Eventualmente, formula una afirmación universal, "todos los árboles tienen hojas".

El método inductivo no logra explicar el proceso real de la ciencia. Antes que nada, ningún científico trabaja sin proyecto preconcebido de acuerdo con el tipo de fenómeno por observar. Los científicos escogen para sus estudios objetos o sucesos que, en su opinión, es probable que les proporcionen las respuestas a preguntas de su interés. De lo contrario, como Darwin (1903) escribió, "uno puede igualmente ir a una mina de grava y contar los guijarros y describir los colores". Un científico cuya meta fuera registrar cuidadosamente cada hecho observado en todos los momentos de vigilia de su vida, no contribuiría mucho al avance de la ciencia; muy probablemente, sería considerado un loco por sus colegas.

Además, la inducción no logra llegar a verdades universales. No importa cuántas afirmaciones singulares puedan ser acumuladas, ninguna afirmación universal puede ser derivada lógicamente de tal acumulación de observaciones. Aun cuando todos los árboles observados hasta esos momentos tengan hojas, o todos los cisnes observados sean blancos, queda una posibilidad lógica de que el siguiente árbol no tenga hojas o que el siguiente cisne no sea blanco. El paso de numerosas afirmaciones singulares a una universal implica amplificación lógica. La afirmación universal tiene un mayor contenido lógico, esto es, dice más que la suma de todas las afirmaciones singulares.

Otra seria dificultad de la inducción como la propuesta del método científico es que las hipótesis y teorías científicas son formuladas en términos abstractos que no ocurren para nada en la descripción de los sucesos empíricos. Mendel, el fundador de la genética, observó en la progenie de plantas híbridas que las características alternativas se segregaban de acuerdo con ciertas proporciones. Repetidas observaciones de estas proporciones nunca podrían haberle llevado inductivamente a la formulación de su hipótesis de que existen factores (genes) en las células sexuales que se combinan en la descendencia de acuerdo con ciertas reglas. Los genes no fueron observados, y por lo tanto, no podrían ser incluidos en afirmaciones que reflejen lo que Mendel observó. Las hipótesis científicas más interesantes y fructíferas no son simples generalizaciones. Por el contrario, las hipótesis científicas son creaciones de la mente, sugerencias imaginativas de lo que podría ser cierto.

La inducción yerra en los tres puntos señalados. No es un método que asegure la objetividad y que evite las preconcepciones; no es un método para alcanzar la verdad universal, y no es una buena descripción del proceso por medio del cual los científicos formulen sus hipótesis y otras formas del conocimiento científico. Es un asunto diferente el que, de hecho, un científico pueda llegar a una nueva idea o desarrollar una hipótesis como consecuencia de repetidas observaciones de fenómenos relacionados entre sí. Pero cómo llegamos a tener una nueva idea es una cuestión distinta de por qué aceptamos que algo es científicamente válido. Ya hemos señalado esta distinción pero volveremos a ella de nuevo.

El método hipotético-deductivo

Ya hemos señalado que la validez de una idea científica (una "hipótesis") se establece derivando ("deducción") sus consecuencias con respecto al mundo real, y procediendo a averiguar si la predicción derivada es correcta o no. Se dice que el método científico es, por lo tanto, *hipotético-deductivo*. (Es esencial al proceso, como se explicará, que para que la observación de tales consecuencias sirva para validar la hipótesis, no debe saberse de antemano si tales conse-

cuencias se cumplen o no; también se requiere que las consecuencias sean poco probables.)

El análisis del método hipotético-deductivo se remonta a William Whewell (1794-1866) y William Stanley Jevons (1835-1882) en Inglaterra, y a Charles S. Peirce (1838-1914) en los Estados Unidos. La caracterización más precisa del método científico ha sido expuesta por Karl R. Popper (1959; véase también Hempel, 1965). Los científicos, por supuesto, practicaban el método hipotético-deductivo mucho antes de que estuviera adecuadamente definido por los filósofos. Eminentes practicantes de este método incluyen a Blaise Pascal (1623-1662) y a Isaac Newton (1624-1727) en el siglo XVII, y, entre los biólogos del siglo XIX, a Claude Bernard (1813-1878) y Louis Pasteur (1822-1895) en Francia, Charles Darwin (1809-1882) en Inglaterra y Gregor Mendel (1822-1884) en Austria. Éstos, y otros grandes científicos, practicaron el método hipotético-deductivo aún cuando algunos de ellos, por ejemplo Darwin, alegaban ser inductivistas con el fin de concordar con los debates de los filósofos contemporáneos.

El premio Nobel François Jacob, en su autobiografía, describe como sigue la investigación, en el Instituto Pasteur de París, que lo llevó en la década de los cincuenta a uno de los descubrimientos fundamentales de la biología molecular:

> Lo que hizo posible el análisis de la multiplicación de los bacteriófagos, y el entender sus diferentes estadios, fue, sobre todo, el juego entre las hipótesis y los experimentos; entre las construcciones de la imaginación y las inferencias que de ellas se derivaban. Comenzando con una cierta concepción del sistema, uno diseñaba un experimento para probar uno u otro aspecto de esta concepción. Dependiendo del resultado, se modificaba la concepción para diseñar otro experimento. Y así sucesivamente. Así es como la investigación funcionaba en biología. Contrariamente a lo que anteriormente se pensaba, el progreso científico no consistía simplemente en observar, acumular hechos experimentales y extraer una teoría de ellos. Comenzaba con la invención de un mundo posible, o un fragmento de él, lo cual era entonces comparado por medio de la experimentación con el mundo real. Y era este constante diálogo entre la imaginación y la experimentación el que le permitía a uno formar una concepción cada vez más refinada de lo que llamamos realidad [Jacob, 1988, pp. 224-225].

La ciencia es una compleja actividad que consiste esencialmente de dos episodios interdependientes, uno imaginativo o creativo, y otro crítico. El tener una idea, proponer una hipótesis, o sugerir lo que puede ser verdadero es un ejercicio creativo. Pero las conjeturas científicas o hipótesis deben además estar sujetas a examen crítico y contrastación empírica. El pensamiento científico puede ser caracterizado como un proceso de invención o descubrimiento, seguido por su validación o confirmación. A uno de los procesos concierne la formulación de nuevas ideas ("adquisición de conocimiento"); al otro concierne su validación ("justificación del conocimiento").

A los científicos, al igual que al resto de la gente, se les ocurren nuevas ideas, es decir "adquieren" conocimiento, de muy diversas maneras: de conversaciones con otras personas, de leer libros y periódicos, de generalizaciones inductivas, y hasta de sueños y observaciones erróneas. Se dice que Newton fue inspirado por una manzana que cayó. Kekulé había estado intentando sin éxito diseñar un modelo para la estructura molecular del benzeno; una tarde se encontraba adormilado frente al fuego; las flamas le parecieron como grupos de átomos en forma de serpientes. De pronto, una serpiente apareció mordiendo su propia cola y luego girando burlonamente frente a él. La apariencia circular de la imagen le inspiró el modelo del benzeno en anillo hexagonal. El modelo para explicar la diversificación evolutiva de las especies le vino a Darwin mientras montaba su carruaje y observaba el paisaje. "Puedo recordar el punto preciso en el camino [...] cuando para mi alegría, me vino a la mente la solución; [...] la solución es que la progenie modificada [...] tiende a adaptarse a diversos lugares en la economía de la naturaleza". (Darwin, 1958)

Las hipótesis y otras conjeturas imaginativas son el estado inicial de la investigación científica. Es la conjetura imaginativa de lo que puede ser verdadero lo que proporciona el incentivo para buscar la verdad y una clave de dónde podemos encontrarla (Medawar, 1967). Las hipótesis guían la observación y la experimentación porque sugieren qué es lo que debe ser observado. El trabajo empírico de los científicos es guiado por hipótesis, ya sea explícitamente formuladas o simplemente en la forma de conjeturas vagas o intuiciones acerca de cuál sea la verdad. Pero la conjetura imaginativa y la observación empírica son procesos mutuamente interdependientes. Las observaciones hechas para probar una hipótesis son a menudo la fuente de inspiración de nuevas conjeturas o hipótesis. Como lo describe Jacob, el resultado de un experimento a menudo inspira la modificación de una hipótesis y el diseño de nuevos experimentos para probarla.

La concepción de una idea es el punto de partida de la investigación científica, pero este proceso no es objeto de investigación en lógica o epistemología. Los complejos sucesos conscientes e inconscientes que están detrás de la mente creativa son propiamente el interés de la psicología empírica. El proceso creativo, obviamente, no es único para los científicos. Los filósofos, así como los novelistas, poetas y pintores, también son creativos; ellos también proponen modelos de experimentación y también generalizan por inducción. Lo que

distingue a la ciencia de otras formas de conocimiento es el proceso por el cual este conocimiento es justificado o validado.

El criterio de demarcación

El probar una hipótesis (o teoría) implica por lo menos cuatro actividades diferentes. Primero, la hipótesis debe ser examinada en cuanto a su consistencia interna. Una hipótesis que es autocontradictoria o que no está lógicamente bien formulada, debe ser rechazada.

Segundo, la estructura lógica de una hipótesis debe ser examinada para averiguar si tiene valor explicativo; esto es, si hace al fenómeno observado inteligible en algún sentido, si ayuda a comprender por qué el fenómeno ocurre de hecho como se observa. Una hipótesis que es puramente tautológica debe ser rechazada, ya que no tiene valor explicativo. Una hipótesis científica identifica las condiciones, procesos o mecanismos que responden a los fenómenos que pretende explicar. Por lo tanto, las hipótesis establecen relaciones generales entre ciertas condiciones y sus consecuencias o entre ciertas causas y sus efectos. Por ejemplo, el movimiento de los planetas alrededor del Sol es explicado como consecuencia de la gravedad, y la respiración es un efecto de los glóbulos rojos, que transportan oxígeno de los pulmones a varias partes del cuerpo.

Tercero, la hipótesis debe ser examinada en cuanto a su consistencia con hipótesis y teorías comúnmente aceptadas en el campo particular de la ciencia; es decir, si representa algún avance con respecto a hipótesis alternativas bien establecidas. La carencia de consistencia con otras teorías no siempre es razón para rechazar una hipótesis, aunque a menudo lo sea. Algunos de los grandes avances científicos ocurren precisamente cuando se muestra que una hipótesis ampliamente sostenida es reemplazada por otra nueva, que explica los mismos fenómenos explicados por la hipótesis preexistente, y otros que la hipótesis preexistente no podía explicar. Un ejemplo es el reemplazo de la mecánica newtoniana por la teoría de la relatividad, la cual rechaza, por ejemplo, la conservación de la materia y la simultaneidad de eventos que ocurren a una cierta distancia —dos principios fundamentales de la teoría de Newton.

Abundan ejemplos de este tipo en las disciplinas que avanzan rápidamente, como la biología molecular en el presente. El así llamado "dogma central" sostiene que la información molecular fluye en una sola dirección, de DNA a RNA y a proteínas. El DNA contiene la información genética que determina lo que un organismo es, pero esta información debe ser expresada en enzimas (una clase particular de proteínas) que guíen todos los procesos químicos en las células.

La información contenida en las moléculas de DNA se transfiere a las proteínas por medio de moléculas intermediarias, llamadas RNA mensajero. David Baltimore y Howard Temin ganaron el premio Nobel por descubrir que la información podía fluir en la dirección opuesta, de RNA a DNA, por medio de la enzima transcriptasa reversa. Mostraron que algunos virus, al infectar células, son capaces de copiar su RNA en DNA, el cual después se integra al DNA de la célula infectada, donde es utilizado como si fuera DNA propio de la célula. Otros ejemplos, entre los muchos que podrían darse, son los siguientes. Hasta hace poco, se pensaba universalmente que sólo las proteínas conocidas como enzimas podían mediar (técnicamente "catalizar") las reacciones químicas en la célula. Sin embargo, Thomas Cech y Sidney Altman recibieron en 1989 el premio Nobel por demostrar que ciertas moléculas de RNA actúan como enzimas y catalizan sus propias reacciones. Un ejemplo más concierne a la llamada "colinearidad" entre el DNA y la proteína. Un principio generalmente aceptado era la noción de que la secuencia de nucleótidos en el DNA de un gen se expresa consecutivamente en la secuencia de aminoácidos en la proteína. Esta concepción fue puesta en jaque por el descubrimiento de que los genes se dan en fragmentos, separados por segmentos intermedios de DNA que no portan información genética; Richard Roberts y Philip Sharp recibieron el premio Nobel en 1993 por este descubrimiento.

Estas hipótesis revolucionarias fueron publicadas después de que sus autores las sometieron a severas pruebas empíricas. Las teorías que son inconsistentes con las hipótesis bien aceptadas en la disciplina relevante tienden a ser ignoradas cuando no están avaladas por evidencia empírica convincente. La microhistoria de la ciencia se ve ensuciada con hipótesis rebuscadas o *ad hoc*, a menudo propuestas por individuos que no las apoyan con datos científicos apropiados. Las teorías de este tipo usualmente desaparecen de forma gradual ya que son ignoradas por la mayor parte de la comunidad científica. Sin embargo, en ocasiones atraen interés, cuando una teoría recibe atención de los medios de comunicación o en círculos políticos o religiosos. El desastre de la propuesta reciente sobre la "fusión fría" es, sin embargo, un ejemplo de una hipótesis mal contrastada experimentalmente que recibió alguna atención de la comunidad científica porque sus proponentes eran científicos renombrados (Taubes, 1993).

La cuarta y más distintiva de las pruebas a que debe someterse una hipótesis es la siguiente: una hipótesis científica debe ser probada empíricamente indagando si las predicciones acerca del mundo de la experiencia derivadas como consecuencias lógicas de la hipótesis, concuerdan con lo que se observa o no. Éste es el elemento crítico que distingue a la ciencia empírica de otras formas

de conocimiento: el requerimiento de que las hipótesis científicas sean refutables empíricamente. Las hipótesis científicas no pueden ser consistentes con todos los estados posibles de sucesos en el mundo empírico. Una hipótesis es científica sólo si es consistente con algunos pero no con otros estados posibles de sucesos aún no observados, de manera que puedan ser sujetas a la posibilidad de refutación por observación. Las predicciones derivadas de hipótesis científicas deben ser lo suficientemente precisas para limitar el rango de posibles observaciones con las cuales son compatibles. Si los resultados de un examen empírico concuerdan con las predicciones derivadas de una hipótesis, se dice que la hipótesis está provisionalmente corroborada; de lo contrario, es refutada.

El requerimiento de que una hipótesis científica sea refutada ha sido apropiadamente llamado el *criterio de demarcación* de las ciencias empíricas, ya que separa a las ciencias empíricas de otras formas de conocimiento (Popper, 1959). Una hipótesis que no está sujeta a la posibilidad de refutación empírica no pertenece al campo de la ciencia.

Verificabilidad y refutabilidad

El requisito de que una hipótesis científica sea refutable, y no simplemente verificable, puede parecer sorprendente en un principio. Podría parecer que el propósito de la ciencia es el de establecer la verdad de las hipótesis antes que intentar refutarlas. No es así. Hay una asimetría entre la refutabilidad y la verificabilidad de las afirmaciones universales que deriva de la naturaleza lógica de dichas afirmaciones. Puede mostrarse que una proposición universal es falsa si es inconsistente con una sola proposición singular (esto es, una proposición sobre un suceso particular), aun cuando sea una sola entre numerosas que sean consistentes con dicha proposición universal. Pero, como se ha señalado en la discusión sobre la inducción, una afirmación universal nunca puede ser probada como verdadera por virtud de la verdad de afirmaciones particulares, no importando qué tan numerosas sean éstas.

Considérese una hipótesis particular de la cual se derivan lógicamente ciertas consecuencias. Considérese el argumento: si la hipótesis es verdadera, entonces la consecuencia específica también debe serlo; es el caso que la consecuencia es verdadera; por lo tanto, la hipótesis es verdadera. Ésta es una manera errónea de inferencia, llamada por los lógicos "falacia de afirmar lo consecuente". El error de esta clase de inferencia puede ser ilustrado con el siguiente ejemplo trivial. Si las manzanas están hechas de hierro, deben caer al suelo cuando son cortadas del árbol; las manzanas caen cuando son cortadas; por lo tanto, las manzanas son de hierro. La conclusión es inválida aun cuando las dos premisas son verdaderas. En general, puede darse el caso de que haya alguna otra hipótesis de la cual se puedan derivar las mismas consecuencias o predicciones. Los fenómenos observados son verdaderos porque son consecuencias de estas diferentes hipótesis, y no de la utilizada en la deducción.

La forma adecuada de la inferencia lógica para afirmaciones condicionales es la que los lógicos llaman *modus tollens* (*modus* = modo; *tollens* = quitar, rechazar). Puede ser representado por el siguiente argumento. Si una hipótesis particular es verdadera, entonces cierta consecuencia debe ser verdadera; pero la evidencia muestra que la consecuencia no es verdadera; por lo tanto, la hipótesis es falsa. Como ejemplo simple consideremos el siguiente argumento. Si las manzanas están hechas de hierro, se hundirán en el agua; no se hunden, por lo tanto no están hechas de hierro. El *modus tollens* es una forma concluyente de inferencia. Si ambas premisas son verdaderas, la conclusión que refuta la hipótesis se sigue necesariamente.

De este razonamiento se sigue que es posible mostrar la refutabilidad de un enunciado universal concerniente al mundo empírico, pero nunca es posible demostrar su verdad de manera concluyente. Esta asimetría entre la verificación y la refutación se reconoce en la metodología estadística de la prueba de hipótesis. La hipótesis sujeta a contrastación, la *hipótesis nula*, puede ser rechazada si las observaciones son inconsistentes con ella. Si las observaciones son consistentes con las predicciones derivadas de la hipótesis, la conclusión adecuada es que la contrastación no refuta la hipótesis nula, y no que la verdad ha sido establecida.

(El requisito de que las hipótesis científicas sean refutables tiene un paralelo en la inferencia estadística, a saber, en el requerimiento de que el dominio de la contrastación sea mayor que cero. Los estadísticos reconocen dos clases de errores: un error del tipo I, la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera, usualmente llamado error alfa; y un error del tipo II, la probabilidad de no rechazar la hipótesis cuando es falsa, simbolizado como beta. Los científicos ponen considerable atención a los errores del tipo I, y por lo tanto, escogen niveles alfa suficientemente bajos, pero ponen menos atención a los errores del tipo II. No obstante, el poder de la prueba depende de la probabilidad, $1 - \beta$, de rechazar la hipótesis nula cuando es incorrecta. Por lo tanto, bajos niveles para alfa y para beta son deseables. Aun cuando para cualquier contrastación dada las magnitudes de alfa y beta estén inversamente relacionadas, el valor de beta puede ser reducido ya sea incrementando el tamaño de la muestra o el número de repeticiones en una prueba.)

Contenido empírico o "veracidad"

Las pruebas de una hipótesis científica deben tener una probabilidad positiva que lleve a rechazar la hipótesis si ésta es falsa. Una hipótesis científica divide todas las proposiciones factuales particulares en dos subclases. Primero, tenemos la subclase de todas las proposiciones con las cuales es inconsistente; ésta es la subclase de los "refutadores potenciales" de la hipótesis. Segundo, hay una subclase de todos las proposiciones que la hipótesis no contradice, la subclase de las proposiciones "permitidas". Una hipótesis es científica sólo si la clase de sus "refutadores potenciales" no está vacía, porque la hipótesis hace empíricamente afirmaciones significativas sólo acerca de sus refutadores potenciales —afirma que son falsos—. "No por nada llamamos a las leyes de la naturaleza 'leyes'; entre más prohíben más dicen" (Popper, 1959).

El contenido empírico o información de una hipótesis (la "veracidad" expresada por un enunciado científico) es medido por la clase de sus refutadores potenciales. Cuanto más grande sea esta clase, mayor será el contenido de información de la hipótesis. Una hipótesis afirma que sus refutadores potenciales son falsos; si cualquiera de éstos es verdadero, se prueba que la hipótesis es falsa. Una hipótesis o teoría consistente con todos los estados posibles o acontecimientos en el mundo natural (por ejemplo, "las aves tienen alas porque Dios las hizo así; los peces no, por la misma razón") carece de contenido empírico, y por lo tanto, no es científica.

Contingencia y certeza en la ciencia

Las hipótesis científicas sólo pueden ser aceptadas contingentemente, ya que su verdad nunca puede ser concluyentemente establecida. Esto no significa que tengamos el mismo grado de confianza en todas las hipótesis que no han sido aún refutadas. De una hipótesis que ha pasado por muchas contrastaciones empíricas se puede decir que está "probada", o "corroborada". El grado de corroboración no es simplemente cuestión del número de contrastaciones, sino de su severidad. Las pruebas severas son precisamente aquéllas que probablemente darán resultados incompatibles con la hipótesis si la hipótesis es falsa. Cuanto más precisas sean las predicciones contrastadas, más severo será el examen. Una contrastación crítica o crucial es un experimento para el cual se dan hipótesis antagonistas que predicen resultados alternativos y mutuamente excluyentes. Una contrastación crítica, por lo tanto, corroborará una hipótesis y refutará las otras.

Un ejemplo es el experimento realizado por Mathew Meselson y Franklin Stahl (1958) para probar el modelo de la doble hélice propuesto por James Watson y Francis Crick (1953) que marca el comienzo de la biología molecular, una de las grandes revoluciones científicas de todos los tiempos. El modelo de la doble hélice predice que la replicación del DNA es "semiconservativa"; esto quiere decir que cada molécula hija de DNA constará de una hebra parental (la hebra conservada) y de una nueva hebra sintetizada. Otros dos modelos posibles de replicación son *1)* el modelo *conservativo*, de acuerdo al cual la molécula de DNA parental es conservada completamente y la molécula hija consiste totalmente en nuevo DNA sintetizado; y *2)* el modelo *disperso*, de acuerdo al cual ambas moléculas hijas de DNA son sintetizadas *de novo* y la molécula parental es degradada en los fragmentos que la componen (nucleótidos), los cuales son posteriormente utilizados, junto con nucleótidos adicionales en la síntesis de moléculas hijas de DNA.

Meselson y Stahl produjeron bacterias que contenían nitrógeno radiactivo (el isótopo N^{15}) en su DNA; luego transfirieron esas bacterias a un medio que contenía nitrógeno ligero (N^{14}). También tenían un método para determinar exactamente la densidad del DNA en las bacterias. El modelo de la doble hélice predecía que después de una generación de replicación todo el DNA tendría una densidad intermedia (ya que una hebra de cada molécula tendría nitrógeno radiactivo y la otra hebra, nitrógeno ligero). Esto también lo predecía el modelo disperso (pues cada molécula tendría más o menos el mismo número de nucleótidos pesados y ligeros); no así el modelo conservativo (el cual predecía que la mitad de las moléculas de DNA serían pesadas y la otra mitad ligeras). El modelo de la doble hélice predecía que después de una segunda ronda de replicación, la mitad de las moléculas de DNA serían intermedias en densidad y la otra mitad sería ligera. Los otros dos modelos llevaban a predicciones distintas para la segunda generación de moléculas. En particular, el modelo disperso predecía que todas las moléculas de DNA serían idénticas unas a otras, con densidades de un cuarto del rango entre las moléculas ligeras y pesadas. Las predicciones de los tres modelos eran también distintas para la tercera y demás rondas de replicación. Meselson y Stahl llevaron a cabo experimentos críticos y corroboraron el modelo de la doble hélice y rechazaron los otros dos.

Cuanto mayor sea la variedad de contrastaciones severas a las que se resista una hipótesis, mayor será su grado de corroboración. Las hipótesis o teorías pueden, por lo tanto, llegar a ser establecidas sin que se les pueda poner en duda razonablemente. El modelo de la doble hélice del DNA, por ejemplo, también fue corroborado por un experimento realizado por J. Herbert Taylor y sus

colegas (1957) utilizando DNA de raíces de plantas, marcado autorradiográficamente; y por la observación directa en el microscopio de cromosomas en replicación (los cuerpos celulares que contienen el DNA; véase Cairns, 1963). Desde la década de los sesenta, las observaciones y experimentos que han corroborado el modelo de la doble hélice (y refutado modelos alternativos del material hereditario) son tan numerosos (y consistentes) como para hacer imposible resumirlos aun en una discusión del tamaño de un libro.

"Hecho" y "teoría" en la ciencia

Algunas veces los científicos se refieren a las hipótesis o modelos científicos que se han establecido, más allá de la duda razonable, como "hechos". Por ejemplo, la composición molecular de la materia, la doble hélice del DNA y la evolución de los organismos, se dice, son hechos. La posibilidad teórica de que éstas y otras hipótesis o explicaciones puedan ser incorrectas permanece como una abstracción, pero han sido confirmadas de tantas formas, y se ha construido tanto conocimiento sobre tales hipótesis, que sería totalmente irracional esperar que se probara, en un futuro, que son incorrectas. Simplemente no esperamos que el sol deje de salir o que la nieve se derrita en algo distinto al agua.

Los científicos, sin embargo, algunas veces se refieren a una hipótesis bien establecida o explicación llamándola "teoría" o "modelo". Los científicos, por ejemplo, hablan de la "teoría molecular de la materia" o de la "teoría de la evolución". Estas expresiones no ponen en duda que el conocimiento en cuestión esté bien corroborado. Más bien, en el uso científico, el término "teoría" a menudo implica un cuerpo de conocimiento, un grupo de explicaciones y principios relacionados entre sí, y los hechos que los sostienen. El uso científico difiere en esto, como en muchos otros casos, del uso común. En lenguaje común, una "teoría" es un hecho imperfecto, una explicación para la cual hay muy poca o ninguna evidencia; como en la afirmación "yo tengo mi propia teoría de quién asesinó al presidente Kennedy".

Error y fraude en la ciencia

El procedimiento por el cual las hipótesis científicas son empíricamente probadas o rechazadas (el *modus tollens*) es un método lógicamente concluyente —si una consecuencia necesaria de una premisa es falsa, entonces, la premisa lo es también. No obstante, el proceso de refutación está sujeto a error humano. Es posible, por ejemplo, que una observación o un experimento que contradigan una hipótesis hayan sido erróneamente formulados o interpretados. Por lo tanto, se requiere a menudo, particularmente en el caso de hipótesis importantes bien corroboradas, que la observación refutadora pueda ser repetida o que se hagan otras pruebas refutadoras.

El *modus tollens* puede también llevar a una conclusión errónea si la predicción examinada no es una consecuencia lógica necesaria de la hipótesis. Por lo general, la conexión entre una hipótesis y las predicciones específicas derivadas de ella no es un asunto sencillo. La validez lógica de una inferencia puede depender no sólo de la hipótesis que está siendo probada, sino de otras hipótesis, ya sean explícitamente formuladas o no, así como de suposiciones que atañen a las condiciones particulares bajo las cuales se dan las inferencias deducidas (condiciones "limitadoras"). Si una predicción particular es refutada, se sigue que la hipótesis probada, así como las otras hipótesis necesariamente implicadas y las condiciones limitadoras no pueden ser todas ellas verdaderas. Existe la posibilidad de que una de las hipótesis subsidiarias o alguna condición asumida sean falsas. Por lo tanto, una prueba adecuada para una hipótesis asume (y en algunos casos, examina) la validez de todas las otras hipótesis y condiciones involucradas en el diseño y realización del experimento u observación por medio del cual va a ser probada la hipótesis.

Las conclusiones erróneas en ciencia son, a menudo, consecuencia de suposiciones erróneas en el diseño o en la realización de los experimentos. Las suposiciones erróneas pueden ser hipótesis erróneas que se consideran correctas, o errores en las condiciones o materiales utilizados. Una razón por la cual los científicos invierten gran parte de su tiempo y esfuerzo en procesos de revisión entre colegas (véase más adelante) es que desean eliminar hipótesis erróneas así como procedimientos incorrectos.

Un experimento (como los requeridos, por ejemplo, para investigar cuestiones de genética de poblaciones) puede llevar varios meses y requerir la inversión de muchos miles de dólares para costos de material, trabajo y equipo. Es por esta razón también que los científicos deben especificar en detalle el material, las condiciones y procedimientos utilizados en sus experimentos. En el formato estándar de un artículo científico hay una detallada sección, con frecuencia titulada "Materiales y Métodos", que sigue a la introducción donde se plantea el problema, pero precede a la presentación de los resultados. Ya que el trabajo del científico depende de la validez del trabajo de otros, los científicos examinan de manera cuidadosa los trabajos de sus colegas. Seguramente ocurren abusos, pero en general son los científicos mismos quienes los descubren.

El fracaso de contrastación adecuada es usualmente la violación que lleva a conclusiones científicas erróneas. Pero aunque estas conclusiones tengan importancia teórica o práctica, otros científicos realizarán pruebas adicionales y descubrirán los errores. La contrastación impropia o inadecuada está a menudo acompañada de otras violaciones de los cánones de la ciencia. Como veremos posteriormente, Robert Koch, el descubridor del bacilo de la tuberculosis, hizo uso de su considerable prestigio para evitar someter su propuesta de haber encontrado la cura de la tuberculosis a revisiones críticas antes de anunciar su "descubrimiento". Los proponentes de la fusión fría cometieron el mismo error de contrastación inadecuada, pero también buscaron gran publicidad y soporte financiero comunicando sus conclusiones a los medios de comunicación, en lugar de someterlas antes a la revisión de sus colegas y a la publicación en revistas científicas.

Los errores en la ciencia no siempre se deben a presupuestos equívocos, ni son por lo general fraudulentos. Hay cuatro pasos en lo que es una progresión continua que va del error inevitable al fraude (National Academy of Sciences, 1989).

En primer lugar, nos encontramos con "caprichos de la naturaleza", eventos que pueden suceder aunque sean poco probables o debido a leyes desconocidas de la naturaleza. Esta situación puede ser ilustrada con un ejemplo, que es únicamente una caricatura. Supongamos que se le pide a un científico averiguar si saldrá la cara o la cruz de una moneda con la misma probabilidad. El científico tira la moneda 20 veces, obtiene caras todas las veces, y concluye que la moneda está sesgada. Con todo, este resultado es compatible con una moneda sin sesgo: la probabilidad de que en las 20 tiradas salga siempre cara es de una millonésima. El ejemplo es una caricatura, ya que un experimento tan simple debería ser repetido muchas más veces antes de llegar a alguna conclusión. La posibilidad de que ocurran estos caprichos de la naturaleza es una razón por la cual los científicos repiten los experimentos.

Los errores también pueden deberse a equivocaciones "honestas". Un científico puede utilizar por equivocación el material incorrecto, medir erróneamente, o suponer las condiciones equivocadas. Estos errores se descubren normalmente por la repetición. Pero un científico no tiene tiempo o recursos ilimitados, así que hasta el más concienzudo de los científicos puede cometer un error. Los errores de este tipo son corregidos cuando otros científicos reproducen los experimentos o cuando contrastan la misma hipótesis de alguna otra forma.

Una tercera fuente de error es la negligencia. Un científico puede llegar a una conclusión errónea por prisa, descuido o desidia. Éstas y otras faltas similares son violaciones a los estándares esperados en ciencia y son reprobadas por los científicos, aun cuando los resultados erróneos no sean intencionales.

Finalmente, tenemos el fraude rotundo, cuando un científico oculta, modifica o fabrica los resultados. Ésta es una violación aún más grave de los estándares científicos que el descuido, y es proporcionalmente penalizada cuando se descubre. La desidia y el fraude pueden ocasionar incontables daños a la empresa científica, pero las conclusiones basadas en ellos es poco probable que persistan, ya que otros científicos buscarán corroborar o refutar cualquier resultado de interés. Algunas veces estos errores serán descubiertos, con altos costos personales, cuando se asume su validez en experimentos realizados por otros científicos.

El método científico en la práctica

El modelo de práctica científica que hemos bosquejado puede ser ejemplificado *ad infinitum* en la historia de la ciencia. Ejemplos bien conocidos son los experimentos de Galileo y de Newton, por los cuales demostraron las leyes del movimiento; igualmente, las mediciones de Pascal sobre la presión atmosférica, la demostración de William Harvey sobre la circulación de la sangre, el rechazo que hizo Antoine Lavoisier de la teoría del flogisto y su demostración de la existencia del oxígeno, los experimentos de Louis Pasteur sobre la fermentación y putrefacción, mostrando que son ocasionadas por organismos vivos; y algunos otros. Hemos bosquejado anteriormente otro ejemplo: el experimento de Meselson y Stahl, con el que demostraron que el DNA se replica tal como lo predice el modelo de la doble hélice. Los dos episodios que caracterizan el conocimiento científico se pueden ver en todos los casos: la formulación de una hipótesis osada está asociada con experimentos inteligentemente diseñados para refutar la hipótesis si ésta no es correcta.

En seguida se describe, de una manera algo más detallada, otro ejemplo: el descubrimiento de las leyes de la herencia de Mendel y la formulación de una teoría que constituye el núcleo de la genética. El ejemplo de Mendel es significativo porque manifiesta el diálogo entre hipótesis y experimento. Los experimentos iniciales diseñados para probar hipótesis simples (por ejemplo, si tanto los rasgos maternos como paternos son transmitidos a la progenie) llevaron a la formulación de nuevas hipótesis (la primera y segunda leyes de la herencia), las cuales fueron posteriormente contrastadas e impulsaron una teoría general de la herencia, la cual fue entonces objeto de experimentos críticos. Es notable que todo esto se llevara a cabo en un solo trabajo científico, siendo su autor un humilde maestro de escuela.

Un paradigma histórico: el descubrimiento de Mendel de las leyes de la herencia

Gregorio Mendel era un monje agustino que vivió en la ciudad austríaca de Brünn (ahora Brno, República Checa). Estudió con distinguidos científicos en la Universidad de Viena y se convirtió en maestro de ciencias del bachillerato. Tuvo éxito donde sus contemporáneos y predecesores distinguidos habían fracasado: descubrió las leyes de la herencia y formuló la teoría sobre la cual se construyó toda la genética moderna.

Mendel realizó experimentos con plantas de guisante y reportó sus descubrimientos en un trabajo publicado en 1866, "Experimentos en hibridación de plantas", notable por su lúcido conocimiento de los requisitos del método científico. Mendel formuló hipótesis; examinó su consistencia con resultados previos; luego sometió las hipótesis a severa contrastación crítica y sugirió pruebas adicionales que podrían ser realizadas más adelante.

El genio de Mendel es evidente en su reconocimiento de las condiciones requeridas para formular y contrastar una teoría de la herencia: diferentes caracteres en una planta (tales como el color de la flor o la forma de la semilla) deben ser considerados individualmente; estados alternativos de los caracteres deben diferir de manera bien clara (como los colores morado o blanco de la flor); se debe conocer con precisión el ancestro de las plantas utilizando únicamente líneas de razas puras en los experimentos. (En el lenguaje técnico moderno, éstas son "condiciones limitantes" que deben obtenerse con el fin de establecer los patrones conforme a los cuales los caracteres paternos son heredados por su progenie.) Las hipótesis de Mendel fueron formuladas en términos probabilísticos; por consiguiente, obtuvo grandes muestras y las sometió a análisis estadístico.

Mendel estudió la transmisión de siete caracteres diferentes en el guisante de jardín, *Pisum sativum*, incluyendo el color de la semilla (amarillo *vs.* verde), la configuración de la semilla (lisa *vs.* rugosa) y el tamaño de la planta (altas *vs.* enanas). Los resultados de los experimentos de Mendel son bien conocidos como para que necesiten una presentación detallada, pero merece la pena analizar los distintos pasos de su metodología. Su primera serie de experimentos fue con plantas que diferían en un solo carácter. Las regulares observadas lo llevaron a ciertas generalizaciones formuladas en forma de ley: sólo uno de los dos caracteres (el carácter dominante) aparece en la primera generación de la progenie; después de la autofecundación, tres cuartos de la segunda generación de progenie exhiben el carácter dominante, y un cuarto exhibe el otro carácter (recesivo); las plantas de la segunda generación que exhiben el rasgo recesivo dan lugar a razas puras en las siguientes generaciones, pero las plantas que exhiben la característica dominante son de dos tipos, un tercio dará lugar a razas puras, y los otros dos tercios son híbridos. Mendel contrastó estas generalizaciones repitiendo sus experimentos para cada uno de los siete caracteres. Estas generalizaciones fueron resumidas en una ley, llamada posteriormente Principio de la Segregación: las plantas híbridas producen semillas que son la mitad híbridas, un cuarto puras para el carácter dominante y un cuarto puras para el carácter recesivo.

Mendel contrastó la hipótesis de la segregación derivando y verificando predicciones adicionales. Por ejemplo, predijo que después de n generaciones de autofecundación la proporción entre plantas de raza pura y plantas híbridas en la progenie de un híbrido debería ser de $2n - 1$ a 1. Explícitamente formuló que esta predicción prevalecería sólo si se da la condición de que todas las plantas tengan "el mismo promedio de fertilidad [...] en todas las generaciones".

El estudio de las progenies de cruzas entre plantas que difieren en dos características (e.g., semillas lisas y amarillas en uno de los progenitores y semillas arrugadas y verdes en el otro progenitor) le permitió formular una segunda ley, que más tarde fue llamada Principio de la Recombinación Independiente. "El principio implica que en la progenie de híbridos en los cuales varios caracteres esenciales son combinados [...] la relación de cada par de caracteres diferentes en uniones híbridas es independiente de las otras diferencias en las dos estirpes parentales originales." Corroboró este principio examinando las progenies de plantas que difieren en tres y cuatro caracteres. Predijo correctamente y corroboró experimentalmente que en las progenies de plantas híbridas para n caracteres habrá 3^n clases diferentes de plantas.

La formulación y la corroboración experimental de los dos principios establecidos (también conocidos como la primera y segunda leyes de la herencia) ocupan aproximadamente la primera mitad del trabajo de Mendel. En este punto Mendel adelanta lo que él propiamente llamó una "hipótesis" o teoría para explicar los resultados experimentales previos y las dos leyes. La segunda mitad del trabajo está dedicada a deducir predicciones de la teoría y a contrastarlas.

La teoría de Mendel de la herencia contiene los siguientes elementos: *1)* para cada carácter, en cualquier planta, sea híbrida o no, hay un par de factores hereditarios ("genes"); *2)* estos dos factores son heredados, uno de cada padre; *3)* los dos factores de cada par se segregan durante la formación de las células sexuales, de manera que cada célula recibe sólo un factor; *4)* cada célula sexual recibe uno u otro factor de un par con una probabilidad de un medio; *5)* los factores alternativos para diferentes caracteres se asocian al azar en la formación de las células sexuales.

El bien merecido reconocimiento de Mendel como uno de los más grandes científicos de todos los tiempos se basa particularmente en la formulación de esta teoría de la herencia. Mendel estaba también consciente del estatus lógico de su propuesta, es decir, que era una hipótesis que requería corroboración experimental. Poco después de haber formulado la teoría resumida en el párrafo anterior, escribió: "esta hipótesis bastaría para dar cuenta del desarrollo de los híbridos en generaciones separadas", esto es, la hipótesis era consistente con los experimentos previos. Pero esto no era suficiente, como él mismo reconoció, ya que la teoría había sido diseñada para concordar con los resultados. Nuevas pruebas serían requeridas. Añadió: "Con el fin de someter estas proposiciones a una prueba experimental, se diseñaron los siguientes experimentos". Los experimentos fueron dos series de retrocruzamientos que confirmaron la segregación y el arreglo independiente en las células huevo, y luego en las células del polen.

La destrucción del conocimiento por la ideología: Lysenko y la genética en la Unión Soviética

Febrero de 1935. El agrónomo Trofim Denisovich Lysenko —un charlatán oportunista con pretensiones de gran científico revolucionario— se dirige al Segundo Congreso de Granjas Colectivas sobre la penosa situación de la agricultura soviética. Lysenko castiga a los genetistas soviéticos, acusándolos de ser enemigos del pueblo, ya que destruyen la agricultura soviética al depender de teorías abstractas importadas del occidente capitalista. Stalin, que preside el acto, expresa su aprobación: "¡Bravo, camarada Lysenko, bravo!"

La aprobación pública de Stalin consumó el meteórico ascenso de Lysenko al poder y la fama. Por tres largas décadas, hasta la caída de Kruschev, en octubre de 1964, Lysenko y sus partidarios presidieron y controlaron la agricultura soviética, impusieron sus ideas en biología y completaron la eliminación de la genética soviética (y de numerosos genetistas soviéticos que fueron sentenciados a muerte, enviados a campos de concentración, o en el mejor de los casos despedidos de sus trabajos de enseñanza e investigación). En consecuencia, la Unión Soviética, un país con enorme potencial agrícola, devendría, por muchos años, insuficiente en agricultura y se estancaría en biología (contrariamente a su éxito en otras disciplinas, como la física y las matemáticas).

Lysenko denunció a la genética como una ciencia capitalista que perpetuaba la noción de que hay diferencias cualitativas —afirmando que tenían su origen en los genes— entre plantas, animales, o gente. Tales diferencias inmutables

no existen, de acuerdo con Lysenko; las diferencias entre los individuos se deben a los efectos del ambiente y pueden ser radicalmente modificadas exponiendo los organismos a retos ambientales apropiados. Por lo tanto, la producción de nuevas cosechas, o su adaptación a nuevos hábitats, no necesita pasar por un largo proceso de selección de los genotipos adecuados, como proponen los capitalistas, sino que puede lograrse simple y rápidamente exponiendo las semillas de plantas jóvenes a las condiciones apropiadas. En la cima de su poder, bajo la aprobación protectora de Stalin, las absurdas ideas de Lysenko incluían la afirmación de que en el ambiente apropiado las plantas de trigo producen semillas de centeno.

Lysenko prometió rápido incremento en la producción de las cosechas y en la transformación de tierras estériles o pobres en tierras fértiles y productivas. Introdujo prácticas como el método de "vernalización" para la adaptación de las semillas a climas duros, o el sistema pastizal de rotación de los cultivos, que resultaron ser enormes catástrofes para la agricultura. Suprimió la investigación en genética y eliminó la enseñanza de esta disciplina en las universidades e institutos de agricultura.

¿Cómo pudieron afirmaciones absurdas de tan enorme magnitud y consecuencia económica persistir por décadas? Por supuesto, tuvieron que ver factores sociales y políticos, entre otros. Lo relevante para el propósito actual es que Lysenko esquivó las prácticas tradicionales de la ciencia. Evitó las pruebas que, diseñadas apropiadamente, pudieran refutar sus teorías y, en su lugar, respaldó sus afirmaciones con experimentos mal elaborados y que pudieran ser interpretados a voluntad. Cualquier evidencia que mostrara lo contrario fue negada o denunciada con base en que nada que contradijera la ideología dominante del marxismo-leninismo podía estar en lo correcto. El enorme fracaso de las prácticas agrícolas de Lysenko fue atribuido a la subversión de los campesinos y de los enemigos del pueblo. Cualquier evidencia, cualquier práctica, cualquier teoría era juzgada por su congruencia con la ideología marxista; sólo aquellas acciones que servían a la causa del Estado soviético estaban justificadas.

Hasta qué punto las consideraciones políticas, en vez de la práctica científica, predominaban en esta historia, se pone de manifiesto en el registro estenográfico de la sesión de la Academia Lenin para la Ciencia de la Agricultura de la URSS (julio 31-agosto 7, 1948). En esa ocasión, Lysenko destrozó lo que quedaba de la genética (y de los genetistas) en la Unión Soviética. En el discurso inaugural, Lysenko declara:

> El partido, el Gobierno y personalmente J. V. Stalin, han tenido un interés persistente en el desarrollo ulterior de la enseñanza del Michurin. No hay empresa más

honorable para nosotros, como biólogos soviéticos, que el desarrollar creativamente la enseñanza de Michurin. (Ivan Vladimirovich Michurin [1855-1935] fue el horticultor ruso cuyas ideas sobre la herencia de los caracteres adquiridos eran consagradas por Lysenko.)

La transcripción de la última reunión de la sesión de la Academia incluye las observaciones concluyentes de Lysenko:

Camaradas, antes de pasar a mis observaciones concluyentes, considero mi deber hacer la siguiente declaración. Se me pregunta en una de las notas que me han pasado, "¿cuál es la actitud del Comité Central del Partido con respecto a mi reporte?" Yo respondo: El Comité Central del Partido ha analizado mi reporte y lo ha aprobado. (Estruendosos aplausos. Ovaciones. Todos de pie.)

¡Viva la enseñanza de Michurin, que muestra cómo transformar a la naturaleza viva para el beneficio del pueblo soviético! (Aplausos.)

¡Viva el partido de Lenin y Stalin, quienes descubrieron a Michurin para el mundo (aplausos) y crearon las condiciones para el progreso y avance de la biología materialista en nuestro país! (Aplausos.)

¡Gloria al gran amigo de la ciencia, nuestro líder y maestro, camarada Stalin! (todos de pie, aplausos prolongados.)

La transcripción completa de la sesión ha sido traducida al inglés y publicada en *The Situation in Biological Sciences* (véase L. Warren y H. Koprowski, 1991, p. 74).

El curioso caso de Darwin o la discrepancia entre lo que los científicos dicen y lo que hacen

Muy pocos científicos en el siglo XIX o en cualquier momento anterior igualan la clara delineación de Mendel del método científico que él seguía. En los países de habla inglesa, los científicos adelantaban sus hipótesis y luego las probaban en su trabajo, pero a menudo afirmaban en sus escritos que seguían la ortodoxia del induccionismo proclamada por los filósofos como el método para la buena ciencia. Darwin es un notable ejemplo de esta discrepancia.

En su *Autobiografía*, Darwin dice que procedió "según los principios baconianos" y que sus observaciones no estaban hechas "a partir de una teoría" (1958, p. 119). El párrafo inicial de *El origen de las especies* transmite la misma impresión:

Cuando estaba como naturalista a bordo del Beagle, me impresionaron mucho ciertos hechos sobre la distribución geográfica de los seres orgánicos que viven en América del Sur y sobre las relaciones geológicas entre los habitantes actuales y

los pasados de aquel continente. Tales hechos parecían dar alguna luz sobre el origen de las especies, este misterio de los misterios, como lo ha llamado uno de nuestros mayores filósofos. A mi regreso a Inglaterra, ocurrióseme, en 1837, que acaso se podría llegar a descifrar esta cuestión *acumulando pacientemente y reflexionando sobre toda clase de hechos que pudiesen tener quizá alguna relación con ella*. Después de cinco años de trabajo me permití discurrir especulativamente sobre el asunto y redacté unas breves notas, ampliadas en 1844, formando así un bosquejo de las conclusiones que entonces me parecían probables. Desde este periodo hasta el día de hoy me he dedicado invariablemente al mismo asunto. [Cursivas nuestras.]

En muchos otros escritos, Darwin afirma haber seguido los cánones inductivistas; pero los hechos son muy distintos de estas afirmaciones. Sus notas y su correspondencia privada denotan que formuló la hipótesis de la transmutación evolutiva de las especies tiempo después de haber vuelto de su viaje en el Beagle, y que la hipótesis de la selección natural se le ocurrió en 1838 —varios años antes de cuando él admite haberse permitido por primera vez el lujo de "especular sobre el asunto". Entre el regreso del Beagle— el 2 de octubre de 1836, y la publicación de *El origen de las especies* (y, de hecho, hasta el final de su vida)—, Darwin persiguió inexorablemente evidencias empíricas para corroborar el origen evolutivo de los organismos, y para contrastar su teoría de la selección natural.

¿Por qué esta disparidad entre lo que hacía y lo que afirmaba? Hay por lo menos dos razones. Primero, en aquellos tiempos, el término "hipótesis" era generalmente reservado para especulaciones metafísicas sin contenido empírico. Ésta es la razón por la que Newton, el mayor teórico entre todos los científicos, también afirmaba *Hypotheses non fingo* ("yo no fabrico hipótesis"). Darwin expresaba disgusto y, más aún, desprecio por las hipótesis que no pueden ser contrastadas empíricamente. Acerca de Herbert Spencer escribió:

Su manera deductiva de tratar cualquier tema es totalmente opuesta a mi manera de pensar. Sus conclusiones nunca me convencieron[...] sus generalizaciones fundamentales (¡que han sido comparadas en importancia por algunas personas con las leyes de Newton!) las cuales, me atreveré a decir, pudieran ser muy valiosas desde un punto de vista filosófico, son de tal naturaleza que no me parece que sean de ningún valor estrictamente científico. Se trata más de definiciones que de leyes de la naturaleza. No me ayudan a predecir qué sucederá en cualquier caso particular [1958, p. 109].

Hay otra razón, una razón de táctica, de por qué Darwin afirmaba proceder de acuerdo con los cánones inductivistas. Él no quería ser acusado de sesgos

subjetivos en la evaluación de la evidencia empírica. Esto se muestra en una carta que escribe en 1863 a un joven científico: "Yo le sugeriría a usted la ventaja, por ahora, de ser muy comedido en introducir teoría en sus trabajos; *deje que la teoría guíe sus observaciones,* pero sea parco en publicar teoría hasta que su reputación esté bien establecida, porque si no las personas dudarán de sus observaciones". (F. Darwin, 1903, 2:323; véase también Hull, 1973). De manera semejante, los científicos de hoy en día, jóvenes o no, frecuentemente reportan sus trabajos de manera que hacen que sus hipótesis parezcan como conclusiones derivadas de la evidencia que acaban de observar, en vez de presentarlas como preconcepciones contrastadas por observaciones empíricas.

Darwin rechazaba la afirmación inductivista de que las observaciones no deberían estar guiadas por las hipótesis. El enunciado citado anteriormente, "un hombre pudiera igualmente ir a una mina de grava y contar los guijarros y describir los colores", es seguida por esta observación significativa: "qué extraño es que cualquiera pueda no ver que todas las observaciones deben estar a favor o en contra de algún punto de vista si van a servir a algún propósito" (F. Darwin, 1903, 1:195). Él reconocía el papel heurístico de las hipótesis, las cuales guían la investigación empírica diciéndonos qué es lo que merece ser observado, qué evidencia buscar. Y confesaba: "No puedo evitar formular una [hipótesis] sobre cada tema" (1958, p. 141.)

Darwin era un excelente practicante del método hipotético-deductivo de la ciencia, como los estudiantes actuales de Darwin han mostrado abundantemente (DeBeer, 1964; Mayr, 1964; Ghiselin, 1969; Hull, 1973). Darwin avanzaba hipótesis en muchos campos, incluyendo geología, morfología y fisiología de plantas, psicología y evolución, y sometía sus hipótesis a contrastación empírica. "La línea de argumentación frecuentemente seguida en mi teoría, es el establecer un punto como probable por inducción y aplicarlo como una hipótesis a otras para ver si las resuelve" (Darwin, 1960). Popper (1934) no sólo ha puesto en claro que la refutabilidad es el criterio de demarcación que separa las ciencias empíricas de otras formas de conocimiento, sino también que la refutación de hipótesis aparentemente verdaderas contribuye al avance de la ciencia. Darwin reconoció esto: "Los hechos falsos son altamente injuriosos para el progreso de la ciencia, ya que frecuentemente perduran; pero propuestas erróneas apoyadas por alguna evidencia, no ocasionan gran daño, ya que todo el mundo encuentra un sano placer en probar su falsedad; y cuando esto sucede, se cierra el camino hacia el error y al mismo tiempo se abre el camino hacia la verdad" (Darwin, 1871, 2a ed., p. 606.)

Algunos filósofos de la ciencia han afirmado que la biología evolutiva es una ciencia histórica que no necesita satisfacer los requisitos del método hipotético-deductivo. La evolución de los organismos, se ha argumentado, es un proceso histórico que depende de eventos únicos e impredecibles, y por lo tanto, no está sujeto a la formulación de teorías e hipótesis contrastables. Dichas afirmaciones emanan de un malentendido monumental. Hay dos tipos de cuestiones en el estudio de la evolución biológica (Dobzhansky, 1951, pp. 11-12). Unas conciernen a la historia: el estudio de la filogenia, el desenmarañamiento y descripción del curso actual de la evolución sobre la Tierra, que ha conducido al estado actual del mundo biológico. Las disciplinas científicas que contribuyen al estudio de la filogenia incluyen la sistemática, la paleontología, la biogeografía, la anatomía comparada, la embriología comparada y la bioquímica comparada. El segundo tipo de cuestiones concierne a la elucidación de los mecanismos o procesos que causan el cambio evolutivo. Estas cuestiones tratan con las relaciones causales más que con las históricas. La genética de poblaciones, la ecología de poblaciones, la paleobiología y muchas otras ramas de la biología, son las disciplinas relevantes.

Puede haber cierta duda de que el estudio causal de la evolución proceda mediante la formulación y la contrastación empírica de las hipótesis, de acuerdo con la misma metodología hipotético-deductiva característica de las ciencias fisicoquímicas y otras disciplinas que se ocupan de los procesos causales. Pero aun el estudio de la historia evolutiva se basa en la formulación de hipótesis empíricamente contrastables. Consideremos un sencillo ejemplo. Durante muchos años, los especialistas mantenían que el linaje evolutivo que condujo hacia el hombre se separó de los linajes que condujeron hacia los grandes monos (chimpancé, gorila, orangután) antes de que los linajes de los grandes monos se separaran entre sí. Algunos autores recientes han sugerido, por el contrario, que el hombre, los chimpancés y los gorilas están más cercanamente relacionados entre sí, en contraste con el chimpancé y el gorila con respecto al orangután. Un gran número de predicciones empíricas puede ser derivado lógicamente de estas hipótesis. Una predicción concierne al grado de similitud entre enzimas y otras proteínas. Se sabe que la tasa de sustitución de aminoácidos es aproximadamente constante, cuando se toman en cuenta muchas proteínas y largos periodos de tiempo. Si la primera hipótesis es correcta, el grado promedio de diferenciación debería ser mayor entre el hombre y los monos africanos, que entre éstos y los orangutanes. Por otro lado, si la segunda hipótesis es correcta, el hombre y los chimpancés deberían presentar una mayor similitud proteínica que la que presenta cualquiera de los dos en relación con los orangutanes. Estas predicciones alternativas proporcionan una contrastación empírica crítica de las hipótesis. Los datos disponibles favorecen la segunda hipótesis. El hombre, los chimpancés y los gorilas parecen estar

más relacionados filogenéticamente entre sí, que como lo está cualquiera de ellos con los orangutanes.

Ciertas disciplinas biológicas importantes para el estudio de la evolución son principalmente descriptivas. La descripción y la clasificación son actividades necesarias en todas las ramas de la ciencia, pero tienen un papel más importante en ciertas disciplinas biológicas, como la sistemática y la biogeografía, que en otras disciplinas, como la genética de poblaciones. Sin embargo, aun la sistemática y la biogeografía utilizan el método hipotético-deductivo y formulan hipótesis empíricamente contrastables.

Reemplazo de teorías: el flogisto y Lavoisier; la mecánica newtoniana y Einstein

La ciencia es progresiva. Las teorías que son aceptadas en un momento dado, pueden ser rechazadas después. Más común aun, sin embargo, particularmente en las disciplinas bien desarrolladas, es que una teoría que explica mucho de lo que se sabe, es eventualmente reemplazada por una teoría distinta que explica los mismos fenómenos, así como otros más que la primera dejaba sin explicar. Dos ejemplos ilustran ambas situaciones: la teoría del flogisto que fue reemplazada por el descubrimiento del oxígeno por Lavoisier y su teoría de la combustión, y la teoría de Newton sobre el movimiento, que fue reemplazada por la teoría de la relatividad.

Johann Becher propuso en 1669 que la materia consistía de tres tipos de tierra: la vitrificable, la mercúrica y la combustible. Una sustancia como la madera consistía en tierra combustible más cenizas. Cuando la madera se quemaba, la tierra combustible era liberada. Medio siglo después, la tierra combustible hipotética fue llamada "flogisto" por Georges Stahl, quien afirmaba que la corrosión de los metales también era una forma de combustión, y que en el proceso se perdía flogisto. La teoría del flogisto fue aceptada por Joseph Priestley y otros eminentes científicos del siglo XVIII.

La teoría del flogisto fue demolida por Antoine Lavoisier en una serie de experimentos publicados en 1787. Esta publicación fue seguida en 1789 por su *Traité élémentaire de chimie*, que bien podría ser considerado el tratado que da inicio a la química moderna. Lavoisier rechazaba la teoría del flogisto con la base de que conducía a predicciones erróneas. Primero notó que las cenizas de la madera y otras sustancias orgánicas quemadas pesaban menos que las mismas sustancias antes de ser quemadas, mientras que el sulfuro y el fósforo pesaban más, aunque el flogisto hubiera sido liberado en ambos casos de acuerdo con la teoría. Lavoisier contrastó la teoría del flogisto, pesando sistemáticamente todas las sustancias involucradas en la combustión o en la calcinación de una gran variedad de sustancias orgánicas así como de metales. Estos experimentos manifestaron la presencia de dos sustancias en el aire; una (a la cual llamó oxígeno) era absorbida al quemar, la otra era el aire "no vital" (nitrógeno) que se quedaba como residuo. Entonces propuso que la combustión no era el resultado de la liberación del flogisto hipotético, sino de la combinación de la sustancia que se quemaba con el oxígeno. Contrastó su teoría con experimentos diseñados cuidadosamente, en los que todas las sustancias involucradas eran pesadas antes y después de ser quemadas; e incluso extendió la teoría a otros procesos que implicaban oxidación, como la oxidación del hierro, y otros fenómenos naturales. De manera similar, Lavoisier explicó que el producto de la combinación del oxígeno con el hidrógeno era el agua. Aplicó esta metodología de contrastar teorías por medio de la predicción de sucesos y la medición precisa de sus resultados, para resolver numerosas cuestiones de interés público. Es bien conocido que en una ocasión colaboró con Benjamin Franklin para bajar de su pedestal a Franz Anton Mesmer, quien afirmaba que era capaz de curar por medio de "magnetismo animal".

La teoría del flogisto también ilustra una importante dimensión del proceso científico: la aversión de los científicos por rechazar las teorías aceptadas antes de que sea formulada otra que dé cuenta de los fenómenos explicados por la teoría preexistente. Joseph Priestley y otros científicos contemporáneos suyos siguieron aceptando durante algún tiempo la teoría del flogisto, aun a la luz de experimentos refutadores. La teoría del flogisto sólo fue generalmente rechazada hacia finales del siglo XVIII, después de que Lavoisier había desarrollado y corroborado su propia teoría de la combustión.

El avance científico ocurre no sólo, como en el caso del flogisto, por medio del reemplazo de una teoría errónea por una correcta, sino también por el reemplazo de una teoría correcta en lo general por otra más precisa o más inclusiva. Los ejemplos son numerosos. Un caso famoso es el reemplazo de la mecánica newtoniana por la teoría de la relatividad de Einstein. Como es común en el progreso del conocimiento científico, las predicciones hechas por la teoría anterior son en general correctas, razón por la cual la teoría, en este caso la mecánica newtoniana, ha pasado numerosas contrastaciones y ha sido generalmente aceptada. Pero la nueva teoría científica es capaz de explicar los fenómenos que la teoría previa había dejado sin explicar. En algunos casos, esto ocurre porque la nueva teoría es mucho más general y es capaz de incluir fenómenos explicados por teorías diferentes o, más aún, por disciplinas distintas. Un ejemplo es la mecánica estadística, que fue capaz de explicar muchas

conclusiones de la termodinámica una vez que se descubrió que la temperatura de un gas refleja la energía cinética de sus moléculas.

En el caso de Einstein *vis a vis* Newton es particularmente interesante que las afirmaciones fundamentales de la teoría newtoniana, e.g., que la masa es constante y que espacio y tiempo son realidades absolutas, son rechazadas por la teoría de la relatividad. Sin embargo, con respecto a los cuerpos con masa intermedia y velocidades intermedias (esto es, los cuerpos y movimientos que se observan en el curso de la experiencia ordinaria), las teorías de Newton y Einstein hacen predicciones prácticamente idénticas.

Isaac Newton (1642-1727) es uno de los grandes científicos de todos los tiempos. Formuló las leyes del movimiento, así como la ley de la gravedad; desarrolló una teoría de la luz, inventó el cálculo, y mucho más. El gran número de descubrimientos de Newton incluye soluciones del llamado "problema de dos cuerpos", i.e., la configuración y dimensiones de las órbitas planetarias; la masa de la Luna (un octavo de la de la Tierra), calculada por la elevación de las mareas; la inclinación del eje de la Tierra (23.5 grados) que da cuenta de las estaciones del año; el tamaño de la convexidad de la Tierra en el ecuador; y demostró que los tiempos de las órbitas planetarias deberían ser proporcionales al cuadrado de sus distancias al Sol, en vez de tres mitades, como lo predijo Descartes.

Albert Einstein (1879-1955) es otro científico gigante. Como Newton, hizo descubrimientos de importancia monumental. En 1905, formuló la teoría especial de la relatividad, la cual establece que la masa de un cuerpo no es constante, como fue asumido por la teoría de Newton y por la experiencia del sentido común, sino que se incrementa con la velocidad del cuerpo y tiende a infinito a medida que la velocidad del cuerpo se acerca a la velocidad de la luz. (La ecuación es

$$m = \frac{m_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

donde m_0 es la masa en reposo, v es la velocidad del cuerpo, y c es la velocidad de la luz en el vacío.) La teoría general de la relatividad de Einstein (1916) establece que la masa no es constante, y que por el contrario puede ser convertida en energía, como expresó por medio de la famosa ecuación $E = mc^2$; que, contrariamente a la experiencia del sentido común y a la teoría de Newton, el espacio y el tiempo no son absolutos; que dos mismos eventos pueden ser simultáneos para un observador, pero no para otros observadores; que la velocidad de la luz es la velocidad máxima posible en el universo; que el ritmo de un reloj en movimiento decrece a medida que su velocidad aumenta (y en consecuencia que si un viajero del espacio dejara a su hermano gemelo en la Tierra mientras él viajara a gran velocidad durante un año, al regresar descubriría que era más joven que su hermano gemelo); y otras consecuencias similares. La teoría especial de la relatividad está ahora bien confirmada y la teoría general se ha mostrado consistente con algunos experimentos críticos diseñados para contrastarla. Con respecto a fenómenos de experiencia ordinaria, los resultados predichos por la relatividad y por la mecánica newtoniana son virtualmente idénticos. En cambio, para fenómenos que ocurren a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, las dos teorías discrepan de manera importante.

El conocimiento científico frecuentemente avanza por la sustitución y suplementación de una teoría por otra más completa, más precisa, y más comprehensiva. De este modo, la teoría moderna de la genética, por ejemplo, identifica circunstancias que son excepciones a la segunda ley de Mendel; ha definido la composición química de los genes; ha integrado ideas originalmente formuladas por la teoría celular; y ha integrado la teoría de Darwin en una subdisciplina conocida como genética de poblaciones.

Ciencia acelerada: la vacuna fallida de Robert Koch contra la tuberculosis

Hacia la mitad de sus 30 años, Robert Koch (1843-1910) era ya considerado un científico distinguido. Ejerciendo como médico y trabajando en un modesto laboratorio que construyó en su propia casa (en la pequeña ciudad de Wollstein en el norte de Alemania), desarrolló métodos para cultivar y fotografiar bacterias. Esos métodos lo llevaron al descubrimiento del ciclo de vida del ántrax (lo cual hizo posible explicar la recurrencia de una enfermedad en grandes pastizales abandonados por mucho tiempo). Después adquirió un puesto científico en Berlín, donde empezó a investigar la tuberculosis, la mayor causa de mortandad en el siglo XIX. El 24 de marzo de 1882, anunció que había descubierto el origen de la tuberculosis, el tubérculo bacillus, descubrimiento que le trajo mayor fama y más tarde el premio Nobel.

Koch aisló y cultivó al tubérculo bacilo y comenzó a buscar una cura para la tuberculosis. Pronto anunciaría que había descubierto una sustancia que podría proteger contra la tuberculosis e incluso la curaría. Ese anuncio fue recibido en el mundo como una bomba. Diarios ingleses como *The Lancet* y *The British Medical Journal* publicaron la traducción completa del artículo, y el *Review of Reviews* le dedicó casi un número completo al asunto. Arthur Conan

Doyle (creador de Sherlock Holmes), quien aún ejercía la medicina cuando era ya un escritor bien conocido, llegó a Berlín poco tiempo después del anuncio, y pronto publicaría un artículo sobre Koch y su descubrimiento.

Dos cosas importunaron el anuncio de Koch. Una fue que rechazó en un principio revelar la naturaleza de la sustancia curativa, aunque si bien lo hizo un año después bajo la presión de la crítica pública. El segundo asunto puede estar relacionado con el primero: la contrastación experimental de la vacuna de Koch estuvo virtualmente ausente. Eventualmente fue probada su ineficacia curativa y preventiva. Koch presupuso, basado en evidencia limitada, que habiendo inyectado bacilos muertos a una persona, si ésta más tarde fuera infectada con bacilos vivos, el resultado sería una reacción local que podría proteger a la persona. En cualquier caso la reacción local serviría para propósitos de diagnóstico. Quizás por su éxito temprano (que incluye el descubrimiento del agente del cólera y su manera de transmisión), Koch se persuadió de que su hipótesis para el diagnóstico y la cura de la tuberculosis probaría ser correcta. De este modo, procedió a anunciarlo como un método curativo sin ninguna contrastación adecuada. *The British Medical Journal*, el cual celebró prematuramente el anuncio original, publicó un artículo devastador condenando a Koch por haber intentado guardar en secreto la composición de la sustancia y por haberla recomendado como remedio sin haber hecho pruebas adecuadas.

El contexto explicativo del descubrimiento, o por qué la contrastación no es suficiente: el DNA de Avery y la deriva continental de Wegener

La contrastación empírica puede ser necesaria, pero no es suficiente para que la comunidad científica acepte una nueva hipótesis. Una hipótesis que ha resistido aun los intentos más severos para refutarla no será aceptada a menos que tenga valor explicativo; i.e., a menos que pueda ser entendida en el contexto científico contemporáneo y a menos que haga inteligible el problema en mano. Hay varios casos notables de descubrimientos científicos que no fueron aceptados en su momento porque eran "prematuros", contextualmente no eran inteligibles. El descubrimiento de Mendel de las leyes de la herencia puede caber en esta situación. Dos ejemplos más recientes son, uno, el descubrimiento de Oswald Avery y sus colegas de que el DNA es la sustancia hereditaria (en lugar de las proteínas, como generalmente se creía en esa época); y dos, la teoría de la deriva continental propuesta por Alfred Wegener.

Avery fue un científico distinguido en una de las principales instituciones de investigación, el Instituto Rockefeller para la Investigación Médica en Nueva York. En 1944 publicó un trabajo, con sus colegas C. M. Mac Leod y M. Macarty, mostrando que el "factor transformador" responsable de la especificidad hereditaria de la bacteria *Pneumoccocus* (agente de la pulmonía severa) era el ácido desoxirribonucleico (DNA) y que las proteínas no estaban involucradas del todo. Avery llevó a cabo series cuidadosas de diversos y muy específicos experimentos que definitivamente identificaron al DNA como el factor transformante y excluye a otras especies moleculares. No hubo objeción a los resultados experimentales, pero la comunidad científica se rehusó por varios años a aceptar que el DNA es la sustancia de la herencia. Esta renuencia derivaba precisamente de lo que se conocía del DNA, "conocimiento" que establecía la imposibilidad para el DNA de codificar la información hereditaria. Impensadamente sucedió que "lo que se conocía" acerca del DNA estaba equivocado; aparentemente al menos un hecho inconsecuente lo estaba. El DNA vino a ser aceptado como la sustancia hereditaria sólo después de que el "detalle" equivocado fue corregido.

El ácido nucleico fue descubierto en 1869 por Johann Friedrich Miescher, un suizo de 25 años de edad. Para la década de los veinte se llegó a conocer dos tipos de ácidos nucleicos (RNA, i.e., ácido ribonucleico, y el DNA) y después de esto su composición fue pronto elucidada. Se mostró que el DNA está integrado con cuatro componentes relativamente simples (nucleótidos) muy parecidos entre sí en todo respecto, excepto en sus bases nitrogenadas, cada una de las cuales podría ser de uno de cuatro tipos: adenina, guanina, citosina y timina (usualmente representadas por A, G, C y T). Mucho del conocimiento relevante viene de Phoebius Aaron Levene, un químico orgánico de alta reputación que también trabajaba en el Instituto Rockefeller. Levene propuso que el DNA estaba hecho de largas repeticiones de los cuatro nucleótidos seguidos uno de otro en una forma invariante. Fue llamada "hipótesis del tetranucleótido", la que fue aceptada sin ninguna objeción —en gran parte porque mediciones exactas de las proporciones de los cuatro nucleótidos no eran posibles con los métodos analíticos de química disponibles en la época, pero además porque fue incorporada en el modelo para la composición de DNA elucidado por el altamente reconocido Levene.

La hipótesis del tetranucleótido hacía imposible que el DNA pudiera ser el portador de la información hereditaria. Una repetición interminable de los mismos cuatro componentes en el mismo orden no puede codificar información de ningún tipo, por la misma razón que una repetición de las mismas cuatro letras del alfabeto español no puede transmitir información semántica, no importando cuán larga sea la secuencia. Por el contrario, se conocía que las

proteínas estaban hechas de unos veinte aminoácidos diferentes, los cuales varían en proporción de una a otra proteína. Las proteínas, por lo tanto, podrían ser una molécula informativa, mientras que el DNA era una molécula "estúpida". Dado que proteínas y DNA estaban ambos presentes en el núcleo de la célula, se asumió generalmente que las proteínas probarían ser las portadoras de la información hereditaria. En cualquier caso, el DNA no lo podía ser; los experimentos de Avery no aguantaron, porque podrían no llevar información. Más tarde, después de que el químico Erwin Chargaff de la Universidad de Columbia mostrara que las proporciones de las cuatro bases, A, T, C, y G, varían de un organismo a otro y que la hipótesis del tetranucleótido era errónea, el DNA vino a ser prontamente aceptado como el material químico de la herencia. La carrera para determinar su estructura se puso en marcha, una hazaña que fue realizada en 1953 por James Watson y Francis Crick.

Un estado de acontecimientos un poco diferentes, pero basados en la misma necesidad de valor explicativo, es el caso de Alfred Wegener, un geólogo y meteorólogo respetado, quien propuso primero en 1912, y desarrolló en 1915, la hipótesis de la deriva continental. Él notó la forma complementaria de la línea de costa en ambos lados del Atlántico y revisó la evidencia geológica y paleontológica esparcida en la literatura, lo que le permitió concluir que durante el Paleozoico tardío (225 a 350 millones de años) todos los continentes estuvieron ensamblados en un único supercontinente, al cual nombró "Pangea".

Wegener contrastó su hipótesis de que los continentes se mueven a la deriva, buscando en la literatura evidencias geológicas, biogeográficas y paleoclimatológicas relevantes. Las evidencias eran extraordinarias; mostraban, por ejemplo, que los estratos y los pliegues en los lados opuestos del Atlántico encajaban precisamente unos con otros, y se extendían más allá de las líneas de costa en patrones complementarios. Wegener, sin embargo, fue incapaz de producir una explicación convincente de cómo los continentes podrían moverse. Su hipótesis fue rechazada con incredulidad y la evidencia relegada a una simple coincidencia. Sólo tres décadas después la deriva continental sería aceptada, una vez que la teoría de la tectónica de placas proporcionara un mecanismo plausible para el desplazamiento continental.

Mecanismos sociales: revisión y publicación

El proceso de contrastar una hipótesis científica puede validarla o refutarla. La validación puede ser más tarde derribada. La refutación es un método lógico conclusivo: si una consecuencia necesaria de una premisa es falsa, entonces la

premisa también debe ser falsa. Pero los procesos de validación y refutación están sujetos a error. Por ejemplo, pueden llegar a conclusiones erróneas si se da el caso de que la predicción contrastada en realidad no sigue lógicamente de la hipótesis. Además, observaciones o experimentos que contradicen a una hipótesis pueden haber sido ejecutados o interpretados erróneamente. Por esto, los científicos requieren que sus experimentos se publiquen con suficiente detalle, de modo que puedan ser repetidos. La repetición actual de experimentos es, no obstante, selectiva. Usualmente está reservada para experimentos de significancia inusual o para aquéllos que contradicen conocimientos bien establecidos. Confrontados con un nuevo resultado que impacta su propio trabajo, en general los científicos no proceden a repetirlo, sino, más bien, se basan en tales resultados cuando formulan sus propias hipótesis y diseñan sus propios experimentos. Si el resultado de los experimentos es inesperado, pueden regresar sobre los resultados originales y repetir, para asegurarse de que son válidos. Pero entonces queda el riesgo de perder tiempo, recursos y prestigio a lo largo del camino.

Para minimizar dichos problemas, los mecanismos de revisión han venido a ser parte integral de la ciencia. La comunidad científica busca simultáneamente estimular el pensamiento innovador y asegurar que las nuevas ideas son revisadas rigurosamente. Por un lado, la ciencia es un proceso creativo en el cual el avance ocurre sólo si las investigaciones son alentadas a desarrollar y contrastar ideas innovadoras. De hecho, la comunidad científica reserva los más altos honores para aquellos individuos que se han arriesgado a tomar perspectivas novedosas para resolver cierto problema. Por otro lado, precisamente porque la ciencia es una actividad acumulativa en la cual cada científico debe construir sobre el trabajo de otros, la comunidad científica tiene gran interés en echar fuera ideas falsas. Por lo tanto, la creatividad es templada por la necesidad de revisiones rigurosas de los nuevos resultados.

Las revisiones hechas por los pares representan un esfuerzo tanto de vigilar los resultados científicos, como de asegurar su diseminación lo más ampliamente posible. La presión que los científicos tienen de publicar deriva no sólo del interés de reconocimiento y desarrollo profesional, sino también del deseo que ellos tienen de estar informados sobre nuevos descubrimientos que puedan guiar su propio trabajo. Porque someter un trabajo para su revisión por pares es la mejor manera de difundir y de establecer prioridades; tanto para difundir nueva información, como para controlar su calidad. Las observaciones de los pares contribuyen al desarrollo de la ciencia, puesto que ayudan a los proponentes de nuevas hipótesis a mejorar sus investigaciones e interpretaciones.

El escrutinio del arbitraje por pares de la ciencia ocurre en una amplia variedad de contextos. Revisión informal puede ocurrir cuando los científicos discuten su trabajo entre ellos en las bancas del laboratorio, durante conversaciones y seminarios, en encuentros científicos. El arbitraje formal generalmente es una parte integral del proceso de publicación científica y del proceso por el cual las bolsas de investigación y otros recursos son distribuidos. Una conclusión que cambia significativamente el cuerpo del conocimiento científico debe ser tomada escépticamente en tanto no haya sido sujeta a revisión por pares y otras formas de arbitraje y escrutinio, incluyendo preferiblemente su publicación en una revista prestigiosa. La publicación en una revista que incluya el arbitraje por pares no garantiza por sí misma la validez de los resultados publicados; no hay tampoco razón para rechazar cualquier trabajo que no ha sido publicado en una revista prestigiada. Pero se debe tratar con suma sospecha cualquier conclusión que no haya sido sujeta al arbitraje.

El arbitraje retrasa algo la publicación de los resultados, pero ese retraso y el largo tiempo que los examinadores y los editores de las revistas dedican a tal proceso están justificados por la necesidad de eliminar resultados erróneos. El proceso de arbitraje está sujeto al error humano y los prejuicios, pero es el más accesible y a menudo el elemento más confiable del proceso de invención, validación y refinamiento por el cual el conocimiento científico avanza.

El arbitraje no impide las nuevas ideas. Los editores de revistas y el "*establishment* científico" no son hostiles hacia los nuevos descubrimientos. La ciencia prospera gracias a los descubrimientos; y las publicaciones científicas compiten para dar a conocer nuevos avances. Los premios más prestigiados son concedidos a aquellos científicos que hacen los más dramáticos e intrépidos descubrimientos, aun cuando éstos contradigan teorías veneradas. Nos hemos referido antes al carácter revolucionario de la teoría de la relatividad de Einstein y al avance explosivo de la biología molecular disparada por una secuencia de descubrimientos inesperados, recompensados por el premio Nobel y por otros premios, que contradecían presupuestos previos.

Equivocaciones, errores, fracasos y prejuicios infectan la ciencia así como otras actividades humanas. Pero el largo y siempre expansivo cuerpo del conocimiento científico y sus aplicaciones útiles atestiguan el éxito de la empresa científica. La metodología distintiva de la ciencia da cuenta en parte de ese éxito, pero los mecanismos institucionales que se han desarrollado, también contribuyen a él.

II. La estructura de las revoluciones científicas: Thomas Kuhn

La idea fundamental de Kuhn (1962) es ésta: la ciencia se desarrolla en dos etapas. Una a la que denomina ciencia normal, y otra a la que llama ciencia revolucionaria. La primera está caracterizada por la acumulación del conocimiento dentro de los cauces establecidos por una comunidad científica; en la segunda se rompen esos cauces y se establecen nuevas concepciones teóricas y metodológicas. Estas concepciones sobre la naturaleza (teorías y conceptos) y la forma en que se llegó a ellas (métodos) constituyen lo que Kuhn denomina paradigmas. Cuando un paradigma sustituye a otro, rebate sus planteamientos teóricos y metodológicos. Que un paradigma sustituya a otro implica que una comunidad científica adopte sus planteamientos teóricos y metodológicos para llevar a cabo su indagación sobre el sector de la naturaleza que le ocupa. Entonces el consenso de la comunidad científica define si las nuevas teorías son constitutivas de un paradigma.

Hasta aquí se han mencionado tres de los conceptos básicos de Kuhn: ciencia normal, ciencia revolucionaria y paradigma. Otras nociones fundamentales son la inconmesurabilidad de los paradigmas sucesivos y la idea del consenso de la comunidad científica como proceso de validación del conocimiento científico.

Kuhn sostiene que su propuesta historiográfica se basa en la generalización de los casos estudiados en la historia de la ciencia, tanto respecto al desarrollo de la ciencia normal como a los momentos de crisis que conducen a las revoluciones científicas (1971, pp. 20-32).

Para Kuhn, la ciencia normal consiste en la investigación basada, sin cuestionamientos, en los paradigmas aceptados por una comunidad científica; es una actividad para resolver enigmas, altamente acumulativa que ha tenido éxito eminente en su objetivo: la extensión continua del alcance y la precisión de los conocimientos científicos (1971, p. 92).

En este último párrafo hay dos nociones que explicar, la de paradigma y la de enigma. Kuhn ha utilizado de distintas maneras la voz paradigma, de forma

— revolución científica —
ciencia normal — crisis — c. revolucionaria
c. normal —