

Rupturas conceptuales

Edición científica

Juan Seguro · All Rights Reserved

El universo y sus observadores

Los capítulos de este volumen examinan cambios en lo que podía concebirse, ponerse a prueba y explicarse. Distinguen una observación nueva de una nueva manera de asignar funciones explicativas, y una posibilidad matemática de una afirmación sobre el mundo físico. Las personas aparecen en estos relatos como participantes en esos cambios; ninguna vida individual proporciona la estructura organizadora del libro.

La secuencia recorre la mecánica, la historia natural, la química, las matemáticas, la física experimental, la biología y el estudio de la cognición. Es una secuencia de problemas, no la afirmación de que el conocimiento avanzara por una única trayectoria inevitable. Cada capítulo enuncia el alcance de su evidencia y, cuando corresponde, los límites de sus fuentes históricas. Las referencias permanecen en los capítulos a los que corresponden.

Índice

Movimiento sin un motor continuo	3
La extinción se convierte en un hecho de la historia natural	9
La vida se abre a la explicación fisicoquímica	14
Las células se convierten en unidades de organización viva	20
La geometría deja de tener una única forma inevitable	26
El infinito se convierte en objeto de comparación exacta	32
Las moléculas gigantes se convierten en una posibilidad química	38
Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975	44
Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente	50
Las leyes deterministas dejan de garantizar la predicción práctica	56
De los infinitos electrodinámicos a las escalas de Wilson	62
Genes discretos y variación continua: una reconciliación estadística	68
Descifrar el código genético: de 1954 a 1966	74
Evolución sin una explicación adaptativa para cada cambio	80
La inmunidad se convierte en selección entre variantes biológicas	86
La demostración formal encuentra límites internos	92
Hacer medible la sensación: psicofísica y cronometría mental	98
Recordar se convierte en reconstruir	104
El cerebro adulto se convierte en un sistema cambiante	110

Movimiento sin un motor continuo

Una piedra sale de una mano, continúa por el aire y finalmente cae. ¿Qué requiere explicación: que siga moviéndose, que se frene, que se desvíe hacia abajo o las tres cosas? Las observaciones no eligen por sí solas la pregunta. Distintas teorías asignan funciones diferentes a la misma secuencia visible.

Un cambio importante en la historia de la mecánica afectó a la persistencia del movimiento. Un cuerpo en movimiento acabó por dejar de necesitar un motor que actuara continuamente solo para mantener una trayectoria rectilínea uniforme. Las interacciones pasaron a ser necesarias para explicar los cambios de esa trayectoria. No fue un único descubrimiento obtenido al observar cómo se deslizaba un objeto. Intervinieron explicaciones rivales sobre la causa, la resistencia, el movimiento natural y la geometría de una trayectoria no perturbada.

1. Por qué un proyectil planteaba un caso difícil

Un objeto empujado desde fuera presenta una situación causal relativamente sencilla mientras continúa el empuje. Un proyectil la complica porque el contacto con quien lo lanza termina antes que su movimiento. Una explicación que exige un motor próximo debe identificar qué sigue produciendo el movimiento.

Una respuesta histórica atribuía una función al medio circundante. La discusión de Buridán rechazaba que el aire impulsara la persistencia del proyectil y situaba una cualidad motriz en el propio proyectil. Como explica el estudio de Jack Zupko, se trataba de una modificación dentro de un contexto

intelectual aristotélico mucho más amplio, no de su abandono en todos los aspectos. [1]

Esta precisión cambia la historia. La discusión medieval no fue simplemente un intervalo vacío entre Aristóteles y la física moderna. Tampoco existió una única «visión medieval» inmutable frente a la cual un científico posterior pudiera realizar una sola observación decisiva. Las teorías podían compartir un vocabulario causal y discrepar sobre dónde reside una causa y durante cuánto tiempo actúa.

2. El ímpetu cambia la ubicación de la causa

En la explicación de Buridán, quien lanza imprime ímpetu en el proyectil. El ímpetu puede sostener el movimiento después de separarse de la mano. La resistencia y una inclinación hacia un movimiento contrario pueden disminuirlo. Su formulación permite la persistencia sin exigir intrínsecamente que el ímpetu se agote por el mero transcurso del tiempo. [1]

Era una posibilidad explicativa importante. Si un objeto se frena, puede preguntarse qué factores opuestos disminuyen lo que se le transmitió, en vez de suponer que separarse del motor debe poner fin al movimiento por sí mismo. La explicación también asocia el ímpetu con la rapidez y la cantidad de materia del cuerpo. [1]

Resulta tentador traducir esa asociación directamente a la cantidad de movimiento moderna. Eso afirmarí­a más de lo que permite la evidencia. Una dependencia verbal semejante no establece una cantidad matemática idéntica, una ley vectorial de conservación ni las mismas reglas para las interacciones. El ímpetu de Buridán seguía siendo una cualidad motriz que desempeñaba una función causal dentro de un sistema conceptual distinto.

El contraste no es, por tanto, simplemente «fuerza externa», seguida de «fuerza interna», seguida de la respuesta correcta. Trasladar la causa propuesta al interior del cuerpo resolvía un problema y conservaba otro: la continuidad del movimiento seguía explicándose mediante un principio motor que el cuerpo poseía. Una formulación inercial modificaría la exigencia de esa causa.

3. La persistencia aún no especifica la trayectoria

Incluso después de admitir que el movimiento persiste, hay que precisar qué cuenta como su continuación no perturbada. La persistencia rectilínea y la circular no son intercambiables. Un cuerpo que se mueve con rapidez constante en una circunferencia cambia continuamente de dirección. En la mecánica moderna, ese cambio requiere aceleración.

Las formulaciones históricas no partían de todo ese marco moderno ya establecido. Las dos primeras leyes de Descartes en los Principios distinguen la persistencia en un estado del carácter rectilíneo del movimiento. Los estudios especializados contrastan esta formulación explícitamente rectilínea con formas de persistencia circular asociadas a Galileo y Beeckman. La comparación no debe convertir cualquier discusión de Galileo en la posterior primera ley de Newton. [2]

Un recurso moderno útil para distinguir las propuestas, no una cita de estos autores, consiste en imaginar que se elimina la restricción sobre un objeto que recorre una circunferencia. ¿La continuación libre propuesta conserva su trayectoria circular, se dirige radialmente hacia fuera o sigue la tangente? Son predicciones distintas y exigen análisis diferentes de lo que hacía la restricción.

El propio tratamiento cartesiano del movimiento circular y de las tendencias de los cuerpos era más complicado que una versión moderna de manual sobre la inercia. No deben corregirse tácitamente su explicación de los efectos centrífugos y sus reglas de colisión antes de evaluar su contribución. Un marco puede contener una nueva distinción potente y conservar, al mismo tiempo, errores de importancia. [2]

4. Qué pasa a ser el estado por defecto de la explicación

El cambio conceptual se aprecia mejor al comparar dos preguntas. «¿Qué sostiene el movimiento uniforme del cuerpo?» invita a buscar un agente que lo mantenga. «¿Qué cambia el movimiento del cuerpo?» permite que el movimiento uniforme sea un estado por defecto, sujeto a las condiciones del sistema de referencia y de la teoría elegidos.

Esto no hace desaparecer las causas. Redistribuye su función. Empezar a moverse, detenerse, cambiar de rapidez y cambiar de dirección requieren explicaciones en términos de interacción. La persistencia de la velocidad no requiere del mismo modo una fuerza adicional. El objeto en reposo y el que se mueve uniformemente pueden analizarse entonces dentro de un mismo esquema dinámico.

La relación moderna $F = ma$ expresa esa distribución para una masa constante en un sistema de referencia inercial, donde F es la fuerza neta y a la aceleración. Se incluye aquí únicamente para aclarar el punto de llegada de la comparación conceptual. No se presenta como la ecuación de Buridán, la fórmula de Descartes ni un resumen de la vía experimental por la que se estableció la mecánica posterior.

Un objeto corriente que se desliza sobre una mesa no muestra el límite sin fuerzas: las fuerzas de contacto y la resistencia

importan. Ver cómo se detiene no refuta, por tanto, la inercia. Pero imaginar una superficie sin rozamiento tampoco constituye por sí solo una demostración experimental. La idealización resulta científicamente útil por su encaje en un sistema más amplio de interacciones y predicciones medibles.

5. Continuidad sin inventar una cadena de transmisión

La secuencia de ideas no constituye evidencia de una transmisión sencilla de Buridán a Galileo y de este a Newton. Un argumento posterior puede parecerse a otro anterior sin transmisión directa; un autor puede conocer un texto anterior y transformar sus supuestos centrales. Establecer una influencia requiere documentos, no solo semejanza conceptual.

Zupko advierte expresamente contra la presentación de Buridán como precursor directo de Galileo. El estudio de Descartes muestra asimismo cómo una nueva ley podía emplear recursos argumentativos heredados de la filosofía escolástica. Estos ejemplos se oponen tanto a una historia de discontinuidad total como a otra en la que la mecánica moderna ya estuviera presente en la terminología medieval. [1,2]

Lo que cambió fue la estructura del problema explicativo. La persistencia pudo distinguirse de la actividad sostenida desde fuera; la rectilinealidad pasó a ser una condición sustantiva; y la resistencia pudo investigarse como una interacción, en vez de tratarse como el agotamiento inevitable del propio movimiento.

6. El problema que quedó abierto

Una vez que el movimiento no perturbado es el estado por defecto, resulta esencial identificar las condiciones en las que se aplica. Hay que distinguir sistemas de referencia, restricciones e interacciones. El logro abre preguntas sobre cómo se relacionan las

leyes ideales con las mediciones en un mundo lleno de rozamiento y aceleración.

La ruptura no fue, por tanto, ni el descubrimiento de que a veces los objetos siguen moviéndose ni la victoria de una persona sobre una confusión universal. Fue una reorganización de qué necesitaba una causa, qué contaba como estado pertinente de un cuerpo y qué desviaciones de ese estado podían investigarse. Esos cambios hicieron posible otro tipo de explicación dinámica.

Referencias

- [1] Zupko, J. "John Buridan." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sección sobre filosofía natural e ímpetu. <https://plato.stanford.edu/entries/buridan/>
- [2] Slowik, E. "Descartes' Physics." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, secciones sobre las leyes del movimiento y las fuerzas de los cuerpos. <https://plato.stanford.edu/entries/descartes-physics/>

La extinción se convierte en un hecho de la historia natural

Un diente fósil puede establecer que un animal existió alguna vez. Establecer que ya no queda vivo ningún miembro de su tipo es un problema diferente. La primera conclusión se apoya en un objeto conservado; la segunda se refiere a una ausencia en lugares que ningún investigador puede inspeccionar por completo.

El cambio conceptual que se examina aquí es la aceptación de la desaparición biológica irreversible como algo que la historia natural podía investigar. Dependía de comparaciones entre formas fósiles y vivientes, pero también de argumentos sobre la exhaustividad y los límites del conocimiento de los animales vivos. La extinción no se leía sin más en una roca.

1. Tres afirmaciones que deben separarse

Consideremos tres conclusiones posibles a partir de un fósil desconocido: difiere de los ejemplares de una colección; pertenece a una especie distinta; y esa especie ya no existe. Ninguna se sigue automáticamente de la anterior. Una colección puede estar incompleta, una especie puede variar y una especie distinta puede sobrevivir en una región no examinada.

El *Essay on the Theory of the Earth* de Georges Cuvier hace inusualmente explícita la conexión entre estos problemas. Describe la reconstrucción de animales fósiles mediante la comparación con la anatomía viviente, el examen de los límites de la variación y la consideración de si todavía podrían encontrarse grandes animales desconocidos. El argumento requiere tanto discriminación anatómica como razones contra la supervivencia continuada. [1]

La fuente utilizada aquí es la quinta edición inglesa de 1827, con material añadido por Robert Jameson. Es una presentación posterior del programa, no el texto literal de la discusión inicial de Cuvier sobre elefantes fósiles en 1796. Al atribuir una afirmación, hay que distinguir, por tanto, el ensayo del autor de las adiciones editoriales.

2. La colección viviente se convierte en evidencia sobre los desaparecidos

Un fragmento aislado aporta información mediante sus relaciones con otras partes y otros animales. Los dientes difieren en forma y disposición; las mandíbulas restringen cómo encajan y funcionan los dientes; los elementos esqueléticos conectados reducen las reconstrucciones plausibles. La comparación aporta restricciones que una imagen imaginativa del animal no proporciona.

Cuvier presentó la correlación entre partes anatómicas como un elemento central para reconstruir cuadrúpedos fósiles. También consideró que las diferencias entre formas fósiles y vivientes debían compararse con las causadas por el clima, la domesticación y la variación dentro de una especie. La afirmación no consistía simplemente en que dos huesos parecían distintos. [1]

Esta estrategia convirtió las colecciones de animales vivos en parte de la evidencia sobre los extintos. Más material comparativo podía reforzar una identificación, revelar que una diferencia aparente era variación ordinaria o mostrar que una reconstrucción anterior había sido demasiado confiada. La fortaleza del método residía en una comparación sometida a restricciones, no en una capacidad mágica de inferir infaliblemente un organismo entero a partir de cualquier fragmento.

Puede reconstruirse la lógica en términos modernos sin respaldar todos los juicios anatómicos históricos. Si una identificación

propuesta exige una combinación de caracteres incompatible con el material comparativo, pierde apoyo. Si partes independientes respaldan la misma distinción, el argumento se refuerza. La clasificación sigue siendo una inferencia revisable cuando aparece material nuevo.

3. Por qué la ausencia de un animal grande parecía aportar más información

Cuvier no consideraba igualmente convincentes todas las ausencias. En su ensayo contrastaba los grandes cuadrúpedos terrestres con los organismos marinos, especialmente las formas que podían habitar aguas fuera del alcance de los métodos de recolección disponibles. El inventario marino viviente era demasiado incompleto para dar la misma fuerza a un argumento basado en la falta de observación. [1]

Para los grandes animales terrestres, argumentaba que los viajes, el conocimiento local y las descripciones anteriores hacían menos plausible que siguieran existiendo algunas formas desconocidas. No obstante, consideró expresamente los interiores inexplorados y las islas como posibles refugios. Había que abordar esa posibilidad; la diferencia anatómica por sí sola no la eliminaba. [1]

Este razonamiento contiene tanto una idea metodológica perdurable como una limitación histórica. La idea es que el valor probatorio de no encontrar algo depende de la oportunidad de encontrarlo. La limitación es que un investigador histórico puede sobreestimar la exhaustividad geográfica y taxonómica del conocimiento disponible.

Un ejemplo probabilístico inventado aclara la distinción sin atribuir cifras a Cuvier. Si una prospección detectaría una población superviviente con probabilidad 0,9, un resultado negativo tiene implicaciones distintas de las de una prospección

negativa con probabilidad de detección 0,01. Las prospecciones repetidas añaden información solo en la medida en que sus fallos no sean meras repeticiones del mismo punto ciego.

El ejemplo no convierte la extinción en un umbral numérico universal. Identifica por qué importan la cobertura, la detectabilidad y la dependencia. Una población diminuta en un hábitat inaccesible plantea un problema probatorio distinto del de un gran animal conspicuo del que cabría esperar muchos rastros independientes.

4. La desaparición no es su mecanismo

Una vez aceptado el argumento a favor de la extinción, su causa sigue abierta. No encontrar un equivalente vivo no determina si la especie desapareció rápida o gradualmente, local o globalmente, por cambio ambiental, competencia u otro proceso.

Cuvier relacionó la evidencia fósil con una historia de revoluciones terrestres. Esa conexión forma parte de la explicación histórica de la fuente. Pero la inferencia de que una especie está ausente del mundo viviente puede separarse lógicamente del acontecimiento geológico que, según la propuesta, la eliminó. Aceptar la primera no exige aceptar todos los elementos del segundo. [1]

Por eso resulta engañoso representar la historia como dos bandos homogéneos: uno que solo creía en catástrofes y otro que solo creía en cambios lentos. Una afirmación sobre la realidad de la extinción, otra sobre la rapidez de un acontecimiento particular y otra sobre el carácter general de la historia terrestre son compromisos diferentes.

La ruptura central del artículo afecta al primero: la desaparición podía convertirse en un objeto legítimo de la historia natural

basada en evidencia. No exige una misma explicación para todas las extinciones ni recapitula la explicación posterior de la diversificación evolutiva.

5. Un mundo histórico sustituye a un inventario completo del presente

Si todo fósil tuviera que corresponder a algo que aún vive en algún lugar, el inventario actual seguiría siendo, en principio, la clave de toda la vida pasada. La extinción genuina rompe esa restricción. Algunas formas del pasado no tienen representantes supervivientes, y reconstruirlas requiere evidencia que el presente por sí solo no puede aportar.

Ese cambio amplía tanto la historia posible como la incertidumbre. El registro fósil puede documentar pérdidas, pero sus lagunas también complican la datación de esas pérdidas. El último fósil encontrado no es automáticamente el último individuo que vivió. Un acontecimiento de la naturaleza y la última observación disponible para un investigador no son idénticos.

La extinción pasó así a ser algo más que una etiqueta para un hueso desconocido. Se convirtió en una afirmación que relaciona anatomía, distribución y tiempo, con una carga de la prueba distinta de la necesaria para demostrar presencia. La nueva pregunta no era solo «¿Qué animal era este?», sino «¿Qué evidencia justifica concluir que su historia ha terminado?».

Referencias

- [1] Cuvier, G. *Essay on the Theory of the Earth*. Quinta edición, con ilustraciones geológicas de Robert Jameson. Edimburgo: William Blackwood, 1827. Ensayo del autor, especialmente las secciones sobre cuadrúpedos fósiles, determinación anatómica y posibilidades de descubrir grandes animales desconocidos. <https://www.gutenberg.org/ebooks/62918>

La vida se abre a la explicación fisicoquímica

La pregunta decisiva era a veces más limitada que «¿Qué es la vida?». ¿Podía una transformación concreta asociada a las células vivas seguir ocurriendo cuando estas se rompían? Si era posible, una explicación que exigiera la actividad continua de un organismo intacto dejaría de ser necesaria para esa transformación.

La fermentación sin células hizo que esta pregunta adquiriera una forma experimental concreta. Su importancia no consistía en producir vida a partir de lo no vivo ni en proporcionar una teoría completa de los organismos. Separó una actividad química de una de las condiciones propuestas para ella y abrió el proceso a un conjunto distinto de experimentos.

1. Distintas afirmaciones vitales se enfrentan a distintas comprobaciones

«Vitalismo» puede ocultar varias afirmaciones: que una sustancia orgánica no puede sintetizarse fuera de un organismo; que una reacción requiere células vivas; que la organización de un organismo exige un principio explicativo particular; o que las descripciones físicas y químicas no pueden agotar todo lo importante sobre la vida. Una operación exitosa no puede refutar todas estas proposiciones a la vez.

La síntesis de urea de Wöhler en 1828 cuestionó una restricción sobre la producción de un compuesto orgánico. No mostró por sí sola que la fermentación pudiera ocurrir sin levaduras intactas, que el desarrollo se comprendiera por completo ni que todas las formas de explicación vital desaparecieran inmediatamente. El

relato posterior de Buchner sitúa la síntesis como antecedente de las disputas sobre la fermentación y describe esas disputas como todavía vigentes. [1]

La lección histórica no consiste en restar importancia a la síntesis. Consiste en identificar exactamente qué dependencia elimina un experimento. Fabricar una molécula fuera de un organismo y reproducir una transformación celular fuera de células intactas son logros relacionados, pero responden a preguntas diferentes.

2. La levadura podía estar viva sin que la vida fuera el mecanismo inmediato

Reconocer que la levadura era material vivo fue importante. Relacionó la fermentación con agentes biológicos organizados, en vez de tratar el depósito visible como un subproducto irrelevante. Pero establecer que la levadura viva realiza normalmente una transformación no establece que el estado vivo intacto sea indispensable para el paso químico.

La conferencia Nobel de Buchner de 1907 relata tanto la explicación celular como las propuestas de que un agente químico del interior de las células podía causar la fermentación. Identifica la propuesta enzimática de Moritz Traube y examina los intentos fallidos de separar un agente fermentador de la levadura. Por tanto, las alternativas eran ya más diversas que una disputa entre quienes creían en la vida y quienes creían en la química. [1]

Un experimento de extracción negativo era ambiguo. Podía mostrar que no existía actividad separable, o que el procedimiento destruía, diluía o no conseguía liberar los componentes pertinentes. Interpretar el fracaso exigía atender a la propia preparación. La misma operación empleada para revelar un mecanismo podía inutilizarlo.

3. La preparación cambia lo que puede ponerse a prueba

Buchner describe la trituración de levadura con arena de cuarzo y diatomita, seguida de presión para obtener un jugo exprimido. El procedimiento buscaba liberar rápidamente el contenido celular evitando disolventes agresivos y un calentamiento excesivo.

Reconoce las discusiones con Hans Buchner y las aportaciones prácticas de Martin Hahn, entre ellas el uso de diatomita y de una prensa hidráulica. [1]

Estos detalles no son decoración incidental de laboratorio. Una afirmación sobre actividad sin células depende de cómo se rompieron las células, qué quedó en el líquido y si la actividad sobrevivió a la manipulación. Una teoría se hizo comprobable mediante una preparación que separaba componentes y conservaba una función medible.

En el sistema resultante, la preparación exprimida podía fermentar azúcar. La separación importante se producía entre la vida celular intacta y la capacidad del material derivado de las células para realizar la transformación. La preparación no dejaba de tener una historia biológica por el hecho de haber roto las células. [1]

Esto limita la inferencia. «Sin células» no significa «elaborado sin componentes biológicos» ni implica que el extracto sea una única molécula purificada. El resultado muestra que la integridad continuada de células completas de levadura es innecesaria en las condiciones ensayadas. Identificar todos los componentes participantes es una tarea adicional.

4. Una explicación química se convierte en un programa

Una vez que puede seguirse la actividad fuera de células intactas, los experimentadores pueden variar la preparación, separar

fracciones, cambiar concentraciones y comprobar si añadir una fracción restaura la actividad que otra ha perdido. En vez de atribuir el proceso al organismo como agente indivisible, pueden investigar las dependencias dentro del sistema de reacción.

La conferencia de Buchner examina trabajos posteriores sobre los componentes necesarios para la fermentación, incluida la restauración de la actividad mediante adiciones de jugo hervido. La ebullición no destruía sin más todo lo pertinente: distinguir entre componentes con diferente sensibilidad al calor aportaba información. La conferencia también describe la importancia del fosfato en el análisis que se estaba desarrollando. [1]

La ganancia conceptual es la capacidad de plantear preguntas que permiten discriminar. Si la fracción A pierde actividad y la combinación $A + B$ la restaura, eso restringe lo que cada fracción puede contener y hacer. No demuestra automáticamente que B sea el único factor ausente ni que A contenga una sola enzima. La inferencia se desarrolla mediante nuevas separaciones y controles.

Es un cambio en el acceso a la explicación. El proceso químico puede manipularse como un sistema de componentes que interactúan. La palabra «enzima» es entonces el comienzo de una investigación del mecanismo, no un sustituto de esa investigación.

5. El testigo histórico no ofrece un veredicto neutral sobre todos sus oponentes

Una conferencia Nobel es un valioso testimonio de un participante, pero también una presentación retrospectiva de un logro. Las descripciones de Buchner sobre las disputas anteriores, la prioridad y la importancia de su resultado no deben convertirse acríticamente en un mapa completo de lo que creía cada químico o fisiólogo.

Su propio relato ayuda a resistir la historia triunfal más sencilla. Registra intentos anteriores de trituración, propuestas enzimáticas rivales, mejoras técnicas y colaboradores. También cita a Pasteur distinguiendo lo que sus experimentos habían establecido de las preguntas aún no resueltas sobre la causa química intrínseca. [1]

El contraste no se produce, por tanto, entre un viejo mundo irracional y otro repentinamente químico. Los investigadores mantenían compromisos explicativos diferentes, y las preparaciones experimentales cambiaron cuáles podían ponerse a prueba. Un nuevo resultado exitoso podía desplazar una afirmación específica de necesidad sin resolver la cuestión filosófica más amplia de la organización.

6. Lo que seguía sin explicarse

Un extracto que fermenta no crece, se reproduce, mantiene un límite o coordina un organismo entero por ese mero hecho. Explicar una reacción fuera de una célula es compatible con que la organización celular siga siendo importante para regular esa reacción en un sistema vivo.

La ruptura hizo innecesarios ciertos agentes vitales especiales para operaciones particulares. No hizo innecesaria la organización biológica ni demostró que conocer una lista de ingredientes baste para reconstruir todas las actividades de la vida.

El cambio perdurable fue metodológico y conceptual: funciones antes ligadas al organismo intacto podían separarse, medirse y reconstituirse parcialmente. Las nuevas preguntas se referían a qué componentes eran suficientes para qué actividades, en qué condiciones y cómo se organizaban esas actividades dentro de las células vivas.

Referencias

- [1] Buchner, E. "Cell-free fermentation." Conferencia Nobel, 11 de diciembre de 1907. Especialmente las páginas impresas 103–111 y la discusión posterior sobre la coenzima y el fosfato. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/buchner-lecture.pdf>

Las células se convierten en unidades de organización viva

Ver una célula y explicar un organismo en términos de células son logros diferentes. Un microscopio puede revelar compartimentos, límites o núcleos sin establecer que tejidos aparentemente distintos comparten una organización común. Una imagen estática tampoco nos dice cómo se originaron las estructuras que contiene.

La transformación conceptual implicó dos afirmaciones que debían relacionarse, pero también podían separarse: que las células son unidades fundamentales en plantas y animales, y que las células nuevas surgen de células existentes. La historia resulta instructiva precisamente porque una teoría influyente podía acertar sustancialmente en la primera relación y ofrecer una explicación incorrecta de la segunda.

1. Una estructura observada todavía no es una unidad universal

El punto de partida habitual es la descripción de Hooke de las cavidades del corcho. Pero las cavidades de aquella preparación no ofrecían una visión transparente de todas las actividades de una célula viva. Identificar un rasgo estructural repetido no proporcionó de inmediato una teoría de la organización viva. [1]

Para superar una descripción local, los investigadores necesitaban comparaciones entre tejidos y organismos. Las paredes vegetales hacían visibles algunos límites; los tejidos animales no presentaban necesariamente el mismo aspecto de separación nítida. Una teoría que superara esa diferencia afirmaba una relación subyacente que no era simplemente una textura visual idéntica.

El trabajo de Schleiden sobre las plantas en 1838 y la extensión de Schwann a los tejidos animales en 1839 incorporaron esa relación a un marco explicativo general. Lo importante era la unidad común de organización, no solo añadir otro objeto a un catálogo microscópico. [1]

La inferencia era ambiciosa. Había que distinguir las semejanzas de los parecidos superficiales e interpretar tejidos de apariencia diferente en relación con el desarrollo y la diferenciación. Una teoría general crea nuevas preguntas sobre las excepciones aparentes, en vez de hacer que cada espécimen se explique por sí mismo.

2. Una generalización fructífera llevaba consigo un mecanismo incorrecto

El marco inicial no contenía ya terminada la biología celular moderna. La explicación de Schleiden permitía que las células se formaran mediante un proceso comparado con la cristalización. Era una explicación del origen de las unidades celulares, no simplemente una negación de que existieran. [1]

Esta distinción importa al evaluar una revolución conceptual. Si falla un mecanismo propuesto de formación celular, no se sigue que también deba fallar la comparación entre la organización celular vegetal y animal. Los distintos componentes de una teoría pueden tener diferente apoyo probatorio.

A la inversa, el éxito de la comparación general no valida todos los mecanismos utilizados para explicarla. Tratar el marco completo como verdadero o falso ocultaría el trabajo de revisión. La pregunta más útil es qué observaciones respaldan qué compromisos.

Una analogía ilustrativa es un mapa que identifica correctamente varios pueblos, pero dibuja una carretera incorrecta entre ellos. Los pueblos no desaparecen al corregir la carretera. En la teoría celular, sin embargo, la corrección afectaba a algo más que una conexión sobre el papel: cambiaba la historia que podía asignarse a cada unidad viva.

3. La continuidad debe seguirse a través del tiempo

Una preparación estática puede mostrar una célula o dos células próximas. No demuestra por sí sola que las dos surgieran por división de la primera. Establecer la continuidad celular requiere evidencia sobre transiciones: secuencias de desarrollo, comportamiento de límites y estructuras internas, y alternativas que pudieran imitar la apariencia de una división.

El trabajo de Robert Remak en la década de 1850 aportó evidencia de que las células derivan de otras por división. Virchow popularizó después el principio de que las células surgen de células. Distinguir la contribución observacional de la formulación célebre evita atribuir todo el desarrollo al nombre más recordado. [1]

La fuente utilizada aquí es una síntesis de un manual moderno, no un registro original de observaciones. Identifica la secuencia histórica, pero no permite reconstruir cada preparación ni resolver todas las disputas de prioridad. La distinción conceptual entre unidad de estructura y unidad de linaje no depende de fingir que esas cuestiones documentales ya están agotadas.

Una vez aceptada la continuidad, una célula recién observada pertenece a una historia reproductiva. Su aparición no se explica simplemente diciendo que material adecuado se ensambló en una forma celular. Puede investigarse qué célula o células anteriores

contribuyeron a ella y cómo la división, el crecimiento y la diferenciación modificaron el linaje.

4. El organismo puede analizarse sin convertirse en un montón

Una explicación celular permite relacionar procesos del tejido con actividades de sus células constituyentes. Pero contar unidades independientes no describe adecuadamente un organismo multicelular. La posición, la comunicación, el material extracelular y las relaciones del desarrollo afectan a lo que hace una célula.

Es un límite lógico de la reducción, no una retirada frente a ella. Un componente puede ser una unidad de análisis útil sin bastar, aislado, para explicar todas las propiedades del conjunto. Afirmar que un edificio está construido con ladrillos no implica que un montón de ladrillos explique su arquitectura; del mismo modo, la analogía no debe ocultar que las células son sistemas activos cuyas interacciones contribuyen a producir su entorno.

El nuevo programa contiene, por tanto, dos direcciones de explicación. Los procesos celulares contribuyen a los tejidos, mientras que el entorno del tejido restringe el comportamiento celular. Reconocer la unidad permite investigar esas relaciones; no elimina la necesidad de estudiarlas.

La misma cautela se aplica a los límites. Una descripción celular práctica debe especificar el organismo y el proceso examinados. No debe convertir la imagen típica de un núcleo dentro de un contorno bien delimitado en una definición sin excepciones que cubra cualquier disposición biológica.

5. Lo que la teoría explica y lo que no

El principio de continuidad celular se refiere a la producción de células dentro de los sistemas vivos a los que se aplica. No es, por sí solo, una explicación completa del primer origen de las células. Inferir que toda célula observada tiene un predecesor celular no proporciona una reconstrucción experimental del origen de la vida.

La teoría tampoco explica por sí sola la herencia, el metabolismo, el desarrollo o la enfermedad en detalle molecular. Aporta un marco de organización en el que buscar mecanismos más específicos. Una unidad general es científicamente productiva cuando conecta observaciones y genera preguntas abordables, no solo cuando ofrece un lema.

El marco también cambia lo que significaría un contraejemplo. Si una aparente célula nueva carece de predecesor observado, las posibilidades incluyen una división que pasó inadvertida, un límite insuficientemente resuelto, una secuencia de desarrollo incompleta o un fallo genuino de la explicación propuesta. La evidencia determina qué explicación está justificada; la teoría no debe impedir que la observación se examine.

6. La ruptura está entre la imagen y la organización

El cambio central no fue únicamente la invención del aumento óptico. Fue relacionar observaciones diversas con una explicación general de la estructura viva, seguida de una corrección de cómo se propaga esa estructura.

Esta historia se resiste a una narración de progreso inevitable. Mejorar la observación importó, pero interpretarla también requirió conceptos revisables. Un mecanismo incorrecto de formación podía coexistir con una poderosa idea sobre la

organización. El marco que finalmente surgió lo hizo separándolos.

Las células se convirtieron en unidades de organización viva cuando su función explicativa se extendió más allá de lo que resultaba visible en una preparación concreta. Se convirtieron en unidades de linaje cuando su continuidad mediante la reproducción adquirió su propia base probatoria. Mantener separados estos logros hace más comprensible la transformación que reducirla a una lista de descubridores.

Referencias

- [1] OpenStax. *Microbiology*, §3.2, “Foundations of Modern Cell Theory”, subsección “The Origins of Cell Theory.” <https://openstax.org/books/microbiology/pages/3-2-foundations-of-modern-cell-theory>

La geometría deja de tener una única forma inevitable

Un enunciado geométrico puede ser imposible de demostrar a partir de un conjunto de supuestos porque no se sigue de ellos. Esa posibilidad cambia el significado de una demostración fallida. Los fracasos repetidos no tienen por qué revelar falta de ingenio; pueden poner de manifiesto un supuesto que pertenece a las premisas y no a las consecuencias.

El desarrollo de la geometría no euclidiana transformó un antiguo problema sobre paralelas en otro nuevo sobre estructuras matemáticas alternativas. La geometría euclidiana no fue refutada. Cambió su condición: podía entenderse como una geometría con supuestos particulares, en vez de como la única forma inevitable del razonamiento espacial.

1. Un postulado problemático

El quinto postulado de Euclides se refiere a cuándo dos rectas, cortadas por una tercera, se encuentran en el lado donde determinados ángulos interiores suman menos de dos ángulos rectos. Una formulación equivalente habitual, bajo los supuestos de fondo usuales de la geometría plana, afirma que por un punto exterior a una recta pasa exactamente una paralela a ella.

La propia equivalencia depende del marco circundante. Sustituir la redacción original por la formulación habitual resulta útil para explicar, pero no debe sugerir que un postulado tiene significado con independencia de los demás axiomas y definiciones con los que opera.

Los intentos de deducir el postulado de las paralelas de premisas supuestamente más evidentes introducían a veces un supuesto

equivalente en otro lugar. La discusión histórica de Wallis y Saccheri ilustra cómo una demostración puede ocultar precisamente el compromiso espacial que pretendía establecer. [1]

Esto no es una acusación de simple descuido. Cuando una geometría estructura los diagramas y las intuiciones habituales, puede resultar difícil reconocer qué hechos aparentemente obvios dependen de ella. La tarea consiste en distinguir lo que sugiere un dibujo de lo que implican los supuestos declarados.

2. Convertir la deducción fallida en otra teoría

Lobachevski y Bolyai desarrollaron alternativas en las que no se imponía la condición euclidiana de las paralelas. Su trabajo permitió investigar las consecuencias de una condición diferente, en vez de utilizar cada consecuencia inesperada como motivo para rechazarla. [1]

En el plano hiperbólico, más de una recta que pasa por un punto exterior puede no cortar una recta dada. La terminología histórica exige cuidado: Lobachevski distinguía las paralelas límite de otras rectas que no se cortan, por lo que sustituir sin más «paralela» por su significado cotidiano en cada enunciado histórico puede inducir a error. [2]

Los triángulos no tienen entonces por qué sumar π radianes en sus ángulos. En la geometría hiperbólica de curvatura constante, la suma es menor. Si la curvatura es $-1/R^2$, el área de un triángulo geodésico es R^2 multiplicado por su defecto angular, $\pi - (A + B + C)$. Es una relación matemática dentro del modelo, no una medición del espacio físico. [1]

En un triángulo ilustrativo con tres ángulos de 30 grados, la suma es 90 grados y el defecto es $\pi/2$ radianes. Su área en ese modelo es $\pi R^2/2$. El ejemplo muestra por qué cambiar la estructura de las

paralelas afecta a las relaciones cuantitativas de toda la geometría. No identifica una región triangular en el universo real.

3. Un modelo responde a una pregunta distinta de la de una imagen

Desarrollar muchas consecuencias sin encontrar una contradicción es valioso, pero no demuestra por sí solo la consistencia. Una estrategia más potente representa la nueva geometría dentro de un marco matemático ya aceptado. Si sus puntos y rectas pueden interpretarse de manera que se cumplan los axiomas exigidos, cualquier contradicción se trasladaría al marco utilizado para construir el modelo.

Esto es consistencia relativa. No es una demostración de que las matemáticas estén absolutamente libres de contradicción.

Establece una relación condicional entre teorías. Los trabajos del siglo XIX que conectaron la geometría no euclidiana con otros métodos geométricos contribuyeron a transformarla de una alternativa aislada en una disciplina matemática dotada de esas conexiones. [1]

Una ilustración moderna es el modelo del disco del plano hiperbólico. Los puntos están dentro de un disco euclidiano; las rectas hiperbólicas se representan mediante diámetros o arcos de circunferencia que cortan el borde en ángulo recto. Esos arcos parecen curvos sobre la página, pero la rectitud dentro del modelo la determinan su métrica y sus geodésicas, no la regla euclidiana del dibujo.

La circunferencia del borde no es una pared a la que los habitantes del modelo llegan finalmente tras recorrer una distancia hiperbólica finita. Confundir la representación con la métrica representada borraría precisamente la distinción que el modelo pretende establecer. Un modelo fiel puede utilizar objetos

matemáticos familiares y asignarles una función estructural diferente.

4. El espacio físico es una pregunta adicional

Una geometría alternativa consistente establece una posibilidad matemática. No establece qué geometría describe mejor las relaciones espaciales medidas. Para ello hacen falta observaciones y una explicación de los instrumentos y procesos físicos utilizados para obtenerlas.

Ni siquiera la medición de un triángulo está vacía de contenido conceptual. ¿Qué establece sus lados? ¿Cómo se transportan o comparan los ángulos? ¿Qué proceso físico se considera que traza una trayectoria recta? El experimento pone a prueba una interpretación geométrica junto con supuestos sobre varillas, señales y medición, no un dibujo aislado.

Esto no priva de sentido a la pregunta empírica. Hace explícitas sus dependencias. Un modelo obtiene apoyo físico mediante aplicaciones exitosas que permiten discriminar, dentro de una explicación de la medición. La consistencia lógica y la adecuación empírica son logros diferentes, y ninguno sustituye al otro.

El triángulo esférico ofrece una advertencia útil sobre el contexto. En una esfera pueden darse tres ángulos rectos cuando los lados son arcos de círculos máximos. Esa observación muestra que la geometría de una superficie puede diferir de la geometría plana. Por sí sola, no demuestra la consistencia de toda teoría no euclidiana ni determina la geometría del espacio físico tridimensional.

5. La aceptación no fue una consecuencia instantánea

Las alternativas históricas no eliminaron inmediatamente las expectativas establecidas. Su significado se entrelazó con desarrollos más amplios de la geometría proyectiva, la geometría diferencial y la axiomática. Las respuestas filosóficas también diferían sobre si las alternativas eran meras construcciones formales o cambiaban la condición de las afirmaciones sobre el espacio experimentado. [1]

Un lector actual puede pasar por alto la dificultad si parte de un catálogo moderno de geometrías. Parte del trabajo conceptual consistió en construir ese catálogo: admitir que una estructura poco familiar, pero desarrollada sistemáticamente, pudiera contar como geometría.

Por eso la transición no debe describirse como el descubrimiento de que Euclides estaba equivocado. Muchos teoremas euclidianos siguen siendo válidos bajo supuestos euclidianos y útiles en aproximaciones físicas apropiadas. Lo que falló fue la inferencia sin restricciones que pasaba de su autoridad familiar a la necesidad de esos supuestos en cualquier contexto matemático o físico.

6. Qué podía preguntarse ahora

El nuevo marco separa tres preguntas: qué se sigue de unos axiomas especificados, cómo relaciona un modelo una teoría con otra y qué descripción matemática se ajusta a una investigación física. Preguntas que antes parecían inseparables pueden recibir respuestas diferentes.

Esa separación es la ruptura conceptual. La geometría se convierte en un campo donde pueden construirse y compararse alternativas sin certificarlas antes como la única descripción inevitable del

espacio. Gana libertad mediante una atención más estricta a los supuestos, mientras las afirmaciones empíricas adquieren una exigencia de medición más clara.

Referencias

- [1] Torretti, R. "Nineteenth Century Geometry." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, especialmente §§1–2 y §4. <https://plato.stanford.edu/entries/geometry-19th/>
- [2] Lobachevski, N. I. *Geometrical Researches on the Theory of Parallels*. Traducción de George Bruce Halsted. Open Court, impresión de 1914, §16. <https://archive.org/details/geometricalresea00lobaiala>

El infinito se convierte en objeto de comparación exacta

Una colección sin fin puede ser mayor que otra colección sin fin, pero «mayor» necesita una definición. Comparar longitudes, densidades o los lugares ocupados por símbolos escritos no responde a la misma pregunta que comparar cuántos elementos contienen las colecciones.

La transformación conceptual asociada al trabajo de Cantor convirtió la correspondencia uno a uno en una base de comparación exacta. Algunos conjuntos infinitos pueden emparejarse elemento a elemento; en otros casos puede demostrarse que los emparejamientos propuestos son imposibles. El infinito pasó así a ser un objeto de diferenciación matemática, en vez de una única manera indiferenciada de decir que un proceso nunca termina.

1. Emparejar cambia la pregunta

Emparejemos cada entero positivo n con el entero par $2n$. Cada entero positivo recibe exactamente una pareja y se alcanza cada entero positivo par. En el sentido de la cardinalidad, los dos conjuntos tienen el mismo tamaño, aunque los enteros pares forman un subconjunto propio de los enteros positivos.

No hay contradicción con la regla correspondiente para los conjuntos finitos. Un subconjunto propio de un conjunto finito no puede tener el mismo número de elementos que el conjunto completo. El ejemplo infinito muestra que esa propiedad finita no se extiende sin matices a los conjuntos infinitos. No debemos introducirla subrepticamente en una definición destinada a investigarlos.

Los enteros también pueden disponerse en una sucesión, por ejemplo 0, 1, -1, 2, -2 y así sucesivamente. Los números racionales positivos pueden enumerarse recorriendo pares de enteros positivos en orden creciente de su suma y omitiendo las fracciones duplicadas. Cada par concreto de numerador y denominador aparece tras un número finito de pasos.

Esta última precisión es esencial. Escribir un patrón sugerente no basta si algunos elementos se posponen indefinidamente. Una enumeración válida debe asignar a cada elemento una posición finita. La construcción ofrece una razón por la que eso ocurre.

2. La densidad no es la cardinalidad

Entre dos números reales distintos cualesquiera hay números racionales. Esa densidad puede hacer que parezca que los racionales llenan la recta en el sentido pertinente. Sin embargo, la densidad se refiere a dónde aparecen los elementos respecto a los intervalos; la numerabilidad, a si admiten una lista completa indexada por enteros positivos.

El artículo de Cantor de 1874 estableció la numerabilidad de los números algebraicos reales y un resultado distinto para los números reales en general. Los números algebraicos satisfacen ecuaciones polinómicas no nulas con coeficientes enteros. Solo hay una cantidad numerable de esas ecuaciones finitas, y cada una tiene un número finito de raíces. Enumerar sistemáticamente las ecuaciones permite, por tanto, construir un argumento de numerabilidad. [1]

La construcción de la fuente ordena las ecuaciones mediante una medida finita de su complejidad. La explicación de aquí expone la idea organizativa moderna, no transcribe cada paso de la demostración original. Lo importante es que un conjunto puede

contener todas esas raíces, ser denso en la recta y seguir siendo enumerable.

La medida introduce otra pregunta diferente. La longitud de un intervalo no es su cardinalidad. Un intervalo del doble de longitud puede tener la misma cardinalidad que el original mediante un simple cambio de escala. Mantener separados estos conceptos evita exigir a la expresión «distintos infinitos» que explique nociones de tamaño no relacionadas.

3. Una demostración invalida cualquier lista propuesta

Para ver el contraste, supongamos que alguien propone una lista completa de los números reales entre cero y uno, escribiendo cada uno en forma decimal. Construyamos un decimal nuevo cuya cifra en la posición n sea 1 cuando la cifra en la posición n del número n de la lista no sea 1, y 2 cuando esa cifra sea 1.

El número nuevo difiere de la primera entrada en su primera cifra, de la segunda en su segunda cifra y de cada entrada n en su cifra n . No puede ser ninguna entrada de la lista. Usar solo 1 y 2 también evita la ambigüedad por la que un decimal finito equivale a otro que termina en nueves repetidos.

Esta es una versión decimal moderna de la estrategia diagonal asociada al trabajo de Cantor de 1891. No es la demostración del artículo de 1874, que utilizaba una construcción diferente con intervalos encajados. Confundirlas convierte una elegante exposición moderna en una atribución histórica inexacta. [1,2]

El argumento no muestra simplemente que una lista concreta mal ordenada falla. Parte de una lista propuesta arbitraria y da una regla que produce un elemento omitido. Su fuerza procede de esa generalidad. Una ordenación mejor no puede eludir la misma construcción.

4. Qué cambia cuando se demuestra una imposibilidad

Antes de una demostración, la incapacidad de encontrar una lista podría reflejar un ingenio limitado. Después del argumento, ninguna enumeración del tipo especificado puede tener éxito. La comparación entre enteros y reales adquiere así un obstáculo definido con precisión.

Esto no afirma que alguna colección física contenga una infinidad de objetos contada experimentalmente. El marco matemático se refiere a conjuntos y correspondencias bajo sus supuestos. Que un infinito matemático sea útil en un modelo físico es una cuestión distinta de si se han observado infinitas cosas físicas.

Una tabla diagonal finita tampoco demuestra la no numerabilidad. Un ordenador puede mostrar cualquier comienzo finito elegido de la regla, pero una lista finita siempre deja muchas posibilidades. La demostración matemática explica por qué la construcción funciona para cada índice de una supuesta lista infinita. Su justificación es deductiva, no una extrapolación a partir de muchos ensayos exitosos.

La ganancia es un nuevo criterio de exactitud. En vez de apoyarse en imágenes de algo interminable, los matemáticos pueden especificar las aplicaciones que existen y demostrar la inexistencia de otras. Una intuición familiar sobre la parte y el todo pasa a ser una propiedad que examinar, no un juez incuestionable de todas las posibilidades.

5. La disputa histórica no fue solo resistencia a la novedad

El trabajo de Cantor se desarrolló en un contexto más amplio que incluía el análisis, las definiciones de los números reales y la correspondencia con Dedekind. Su recepción incluyó objeciones a

los métodos infinitarios y a la condición de las colecciones infinitas completadas. Los estudios históricos registran críticas de matemáticos con compromisos constructivos o fundacionales distintos, no una oposición uniforme. [2]

Aquí importa la distinción entre un proceso que siempre puede continuar y un conjunto infinito completado. Aceptar lo primero no compromete automáticamente a aceptar cualquier operación sobre lo segundo. Los argumentos sobre fundamentos se refieren a qué objetos y principios de razonamiento son legítimos, no solo a si gusta una conclusión sorprendente.

Las paradojas posteriores exigieron aclarar qué colecciones podían tratarse como conjuntos. No convirtieron sin más toda correspondencia anterior en un error. La historia combina la conservación de resultados con restricciones y reconstrucciones de los fundamentos, en vez de una secuencia de victorias totales y derrumbes totales. [2]

6. Un nuevo objeto de investigación

La ruptura fue la posibilidad de comparar infinitos mediante demostraciones de equivalencia y de no equivalencia. Ese logro dejó preguntas difíciles sobre los fundamentos, las construcciones permitidas y las relaciones entre distintas nociones de tamaño. No las redujo a una sola respuesta.

Un subconjunto propio puede tener la cardinalidad del conjunto infinito en el que está contenido; un conjunto denso numerable puede no agotar un continuo; dos intervalos pueden diferir en longitud y admitir una biyección. Cada enunciado resulta comprensible una vez especificada la relación que se mide. El avance no consistió simplemente en tolerar un lenguaje paradójico, sino en sustituirlo por afirmaciones matemáticas distinguibles.

Referencias

- [1] Cantor, G. "Ueber eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen." *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 77, 258–262 (1874). Traducción inglesa de James R. Meyer, "On a Property of the Set of all Real Algebraic Numbers." <https://jamesrmeyer.com/infinite/cantor-1874-uncountability-proof>
- [2] Ferreirós, J. "The Early Development of Set Theory." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/settheory-early/>

Las moléculas gigantes se convierten en una posibilidad química

Una disolución puede contener partículas muy grandes sin contener moléculas muy grandes. Las moléculas pequeñas pueden asociarse en agregados. Alternativamente, una partícula puede ser una sola molécula enorme cuyos átomos están conectados por enlaces químicos ordinarios. Distinguir estas posibilidades cambió lo que la química podía afirmar sobre el caucho, la celulosa y otros materiales.

El concepto macromolecular no exigía un enlace especial reservado a objetos gigantes. Su propuesta central extendía la conectividad química ordinaria a estructuras mucho mayores. El reto consistía en demostrar que el tamaño pertenecía a la propia molécula y no a una asociación temporal de moléculas más pequeñas.

1. Por qué resultaba plausible la explicación mediante agregados

Un comportamiento inusual en disolución no revela directamente la conectividad. Un material puede producir disoluciones viscosas, mostrar comportamiento coloidal o resistirse a la purificación en una especie molecular única y bien definida. Esas observaciones pueden sugerir entidades dispersas grandes y dejar abierta la cuestión de qué mantiene unida cada entidad.

En su conferencia Nobel de 1953, Hermann Staudinger compara los coloides moleculares con los micelares, incluidos los jabones. Explica que su comportamiento semejante contribuyó a hacer

plausibles las interpretaciones basadas en agregados para materiales que después se entendieron como macromoleculares. La alternativa no era simplemente negarse a creer que algo pudiera ser grande. Era otra explicación de qué constituía la partícula grande. [1]

Esta distinción limita lo que puede establecer una sola medición. Una medición sensible al tamaño de partícula puede distinguir un soluto pequeño de una entidad grande y no distinguir una cadena covalente de un agregado. Para poner a prueba la interpretación macromolecular, los investigadores necesitaban operaciones que separaran las consecuencias de la conectividad de las de la asociación.

2. Enlaces ordinarios, extensión extraordinaria

Staudinger describe las macromoléculas como estructuras construidas según los mismos principios de valencia química empleados para moléculas orgánicas más pequeñas. La novedad residía en permitir que esos enlaces conectaran muchas unidades repetitivas en cadenas extensas o redes. [1]

Una fórmula estructural puede ocultar la diferencia si solo da la composición de una unidad repetitiva. La fórmula de una unidad no especifica cuántas están conectadas, cuáles son los extremos de la cadena ni si distintas cadenas tienen longitudes diferentes. Estas preguntas pasan a ser centrales cuando la propia molécula es grande.

«Polímero» tampoco significa necesariamente que todas las moléculas de una muestra tengan idéntico tamaño. Un material puede contener una distribución de longitudes de cadena. Una masa molecular media resume entonces una distribución, en vez de identificar una especie molecular exacta presente en cada partícula.

Esto cambia la exigencia explicativa. No siempre hay que descartar la variabilidad como contaminación que oculta una única molécula pequeña. Puede ser una propiedad de la población macromolecular que el material contiene realmente. Determinar esa población requiere mediciones adecuadas y definiciones explícitas del promedio utilizado.

3. Transformar la química mientras se examina la cadena

Una estrategia especialmente informativa cambia los grupos químicos y pregunta si se conserva el grado de polimerización subyacente. La conferencia de Staudinger presenta las transformaciones polímero-análogas como evidencia de estructuras macromoleculares conectadas. Si los derivados con grupos químicos distintos conservan la relación pertinente entre cadenas, un modelo basado únicamente en la asociación débil afronta una explicación más exigente. [1]

La celulosa y sus derivados proporcionan el contexto histórico desarrollado. El argumento combina la transformación química con mediciones como las determinaciones osmóticas y de grupos terminales, en vez de apoyarse exclusivamente en el aspecto de una disolución viscosa. La tabla 5 de la conferencia compara explícitamente información sobre el peso molecular obtenida por distintos métodos. [1]

La inferencia es más sólida cuando las alternativas se hacen explícitas. Cambiar un grupo lateral también puede alterar la solubilidad, la asociación y la conformación de la cadena. Un cambio observado en la viscosidad no es, por tanto, automáticamente un cambio de longitud de cadena, y una propiedad macroscópica inalterada no demuestra automáticamente que sobrevivieran todos los enlaces covalentes.

El programa experimental necesita restricciones convergentes: qué transformación química ocurrió, si era posible la escisión de cadenas, qué mide el método sensible al tamaño y si varias mediciones respaldan una estructura compatible. La conectividad se infiere mediante esta red de resultados, no se ve directamente en cada uno de ellos.

4. Una ilustración numérica de lo que significa un promedio

Consideremos una muestra inventada con el mismo número de moléculas de masas de 10 000 y 30 000 unidades de masa. Su masa molecular media en número es $(10\,000 + 30\,000)/2 = 20\,000$. Su media ponderada por la masa es $(10\,000^2 + 30\,000^2)/(10\,000 + 30\,000) = 25\,000$.

Las dos respuestas son compatibles porque las moléculas mayores aportan una proporción mayor de la masa de la muestra. Ningún promedio implica que deba existir una molécula de esa masa exacta. Estas cifras son una ilustración explicativa moderna, no valores de los experimentos históricos de Staudinger.

El ejemplo identifica un nuevo problema que el marco macromolecular puso de relieve. Un «peso molecular» comunicado necesita una definición de la medición. Las discrepancias entre métodos pueden reflejar lo que ponderan, además de errores experimentales o un modelo estructural defectuoso.

Esto no significa que toda discrepancia pueda justificarse mediante una distribución. La agregación, la degradación, la ramificación y los efectos del disolvente pueden importar. El concepto de distribución aporta alternativas comprobables y fomenta la comparación entre métodos; no debe convertirse en una excusa universal para mediciones incompatibles.

5. La conferencia registra un campo colectivo, no un milagro solitario

La conferencia retrospectiva de Staudinger reconoce trabajos sobre la forma de las partículas, la determinación del peso molecular, la cinética, los polisacáridos, los estudios con rayos X y la microscopía, incluidas las aportaciones de Rudolf Signer, Günter Victor Schulz, Elfriede Husemann y Magda Staudinger. También examina trabajos de otros laboratorios. El programa probatorio era más amplio que la propuesta inicial de una persona. [1]

No obstante, la conferencia es el relato de un participante pronunciado tras el reconocimiento del campo. Sus descripciones de las alternativas anteriores y de lo que constituía una demostración son testimonio histórico, no un veredicto independiente sobre cada controversia. Reconstruir una cronología precisa de la aceptación exigiría registros contemporáneos adicionales de los distintos participantes.

Por eso no es necesario presentar el cambio conceptual como un momento en que todos dejaron de creer en los agregados. Las micelas y otros agregados siguen siendo reales. Lo que cambió fue la capacidad de distinguirlos de las grandes moléculas conectadas covalentemente y de explicar materiales concretos mediante estas últimas cuando la evidencia lo justificaba.

6. Las nuevas preguntas que abrieron las moléculas grandes

Una vez admitidas las moléculas gigantes, la longitud de cadena, la arquitectura, la flexibilidad, la ramificación y las distribuciones se convierten en variables explicativas. Compartir una unidad repetitiva ya no garantiza un comportamiento material idéntico. La pregunta pasa a ser cómo se relaciona la organización

molecular con las propiedades medidas en condiciones especificadas.

Esto no afirma que la química de polímeros explique toda la ciencia de materiales ni que una fórmula macromolecular permita por sí sola predecir cualquier propiedad útil. El procesado, las interacciones entre cadenas y la estructura a mayor escala siguen siendo pertinentes. El concepto molecular permite investigar con más precisión esas dependencias.

La ruptura consistió en extender el enlace químico ordinario más allá de los límites de tamaño que habían restringido la interpretación, y desarrollar formas de distinguir el tamaño molecular genuino de la agregación. La química ganó una nueva variedad de objetos mediante una conexión más exigente entre síntesis, transformación y medición.

Referencias

- [1] Staudinger, H. "Macromolecular chemistry." Conferencia Nobel, 11 de diciembre de 1953. Especialmente las páginas impresas 397–405 y la tabla 5. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/staudinger-lecture.pdf>

Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975

Una teoría puede dar cabida a una observación sin ser la única capaz de dar cabida a ella. Esta distinción pasó a ser central para la física gravitatoria durante las décadas posteriores a la aparición de la relatividad general. El cambio importante no fue simplemente acumular confirmaciones impresionantes. Fue construir experimentos y un lenguaje matemático común que permitieran discriminar entre explicaciones coincidentes en buena parte de la evidencia conocida.

Entre 1915 y 1975, la gravedad adquirió una pregunta experimental más exigente: ¿qué característica de una teoría gravitatoria restringe realmente esta medición? Una órbita planetaria, una frecuencia espectral y el tiempo de recorrido de una señal de radar no ponen a prueba exactamente la misma afirmación. Sus diferencias son útiles. Evitan confundir el acuerdo en un contexto con una confirmación ilimitada en todos ellos.

1. Una antigua discrepancia y una nueva predicción

El perihelio de Mercurio, la dirección de su máxima aproximación al Sol, avanza. La mayor parte de ese movimiento ya podía explicarse mediante las perturbaciones planetarias newtonianas. La discrepancia restante, de unos 43 segundos de arco por siglo, se convirtió en una aplicación exitosa de la teoría de Einstein de 1915. Explicaba un problema existente, en vez de predecir un fenómeno que nadie hubiera advertido. [1]

La distinción no hace científicamente débil el resultado. Una teoría con parámetros restringidos de manera independiente puede explicar una anomalía conocida sin haber sido ajustada libremente

para reproducirla. Pero su función histórica difiere de la de una medición diseñada después de formular una predicción. Estas dos formas de evidencia no deben fundirse en una sola historia de sorpresas repetidas.

La desviación de la luz estelar cerca del Sol ofrecía una comprobación distinta. Las mediciones del eclipse de 1919 compararon posiciones estelares aparentes próximas al Sol eclipsado con posiciones de referencia. El resultado dependía de la medición fotográfica, la estabilidad instrumental y el tratamiento de la incertidumbre. Era evidencia sobre el comportamiento de la luz en el campo gravitatorio solar, no una fotografía de la propia curvatura del espacio-tiempo. [1]

La relatividad especial y la general también deben mantenerse separadas. La primera describe la física local no gravitatoria en sistemas de referencia inerciales; la segunda proporciona una explicación dinámica de la gravitación. La evidencia de dilatación temporal en un reloj en movimiento no permite, por sí sola, elegir la relatividad general frente a todas las teorías gravitatorias rivales.

2. Llevar los desplazamientos gravitatorios de frecuencia al laboratorio

El experimento de Pound y Rebka de 1960 utilizó absorción resonante de rayos gamma para poner a prueba un desplazamiento gravitatorio de frecuencia a lo largo de una separación vertical en un laboratorio terrestre. Un desplazamiento Doppler controlado permitía comparar un efecto gravitatorio extremadamente pequeño con otro ajustable experimentalmente. [2]

En la aproximación de campo débil, la magnitud de la diferencia fraccionaria de frecuencia es aproximadamente gh/c^2 . Aquí g es la

aceleración gravitatoria, h la separación en altura y c la velocidad de la luz. El signo depende de dónde se sitúen el emisor y el receptor. Un fotón recibido a mayor altura en el campo gravitatorio presenta desplazamiento al rojo respecto a la transición local correspondiente.

Para una separación ilustrativa de 20 metros, tomando $g = 9,8$ metros por segundo al cuadrado y $c = 300$ millones de metros por segundo, la magnitud es aproximadamente $2,18 \times 10^{-15}$. Estos valores redondeados ilustran la escala; no reconstruyen las mediciones del experimento. El reto experimental consiste en separar ese desplazamiento del movimiento térmico, la vibración y otros efectos sobre la resonancia.

La medición pone a prueba una relación entre el potencial gravitatorio y la frecuencia de los relojes. Su interpretación no exige tratar el fotón como un pequeño proyectil newtoniano con una masa en reposo ordinaria. Observar con éxito este efecto tampoco establece de manera única todas las ecuaciones de campo de la relatividad general. Varias teorías métricas lo comparten. Un resultado preciso puede ser, por tanto, decisivo para una proposición y dejar otras sin resolver.

3. Medir el tiempo que tarda una señal

En 1964, Irwin Shapiro propuso otra comprobación: una señal de radar que pasara cerca del Sol debería tardar más en completar su recorrido que lo calculado sin la contribución gravitatoria relativista. El observable es un retardo de ida y vuelta, inferido mediante un modelo de las posiciones y el movimiento de los cuerpos implicados. [3]

Esto cambia lo que debe controlarse. Una medición de desviación compara direcciones; un experimento de determinación de distancias compara tiempos. Pueden importar el retardo

instrumental, los parámetros orbitales y la propagación a través del material a lo largo de la trayectoria. Medir mientras cambia la geometría ayuda a distinguir una señal gravitatoria de un desfase temporal fijo.

Resulta tentador explicar el retardo predicho diciendo que la luz simplemente se frena cerca del Sol. Esa frase confunde las descripciones en coordenadas con la medición local. En relatividad general, un observador local en caída libre mide la misma velocidad de la luz en el vacío. El tiempo total de recorrido se refiere a una trayectoria a través de una geometría gravitatoria y a los relojes utilizados para especificarlo. Una velocidad en coordenadas puede cambiar sin introducir una violación de la relatividad especial medida localmente.

4. Las alternativas pasan a formar parte del diseño experimental

En la década de 1960 y a comienzos de la de 1970, los métodos posnewtonianos parametrizados permitían comparar diversas teorías gravitatorias de campo débil mediante parámetros comunes. En vez de preguntar solo si una observación coincidía con Einstein, los investigadores podían preguntar qué combinaciones de parámetros restringía. La propagación de la luz y la dinámica orbital aportaban combinaciones diferentes. [1]

Consideremos la lógica de dos mediciones hipotéticas. Una restringe una combinación de dos parámetros desconocidos; la otra restringe una combinación distinta. Por separado, cada una puede admitir muchas teorías. Juntas pueden excluir alternativas que sobreviven a cada comprobación por separado. Esto no es un conjunto de datos históricos ni un ajuste numérico. Explica por qué un programa coordinado aporta más información que una lista de éxitos aislados.

La comparación está condicionada por el marco. Una teoría que quede fuera de sus supuestos puede exigir otra descripción experimental. Los parámetros no representan automáticamente cualquier desviación imaginable respecto a la relatividad general. Su valor reside en hacer calculable y comparable una clase amplia y declarada de alternativas.

5. Lo que estableció el periodo y lo que no

El periodo que termina en 1975 no debe apropiarse de éxitos posteriores para aparentar una evidencia más sólida. En particular, la medición posterior del decaimiento orbital de un pulsar binario y la detección directa de ondas gravitatorias, mucho más tardía, no pertenecen a sus comprobaciones completadas. La transformación pertinente ya había ocurrido: se diseñaban experimentos cada vez más precisos para distinguir posibilidades gravitatorias.

Tampoco se pasó de ninguna evidencia a una evidencia perfecta. Las observaciones iniciales podían aportar información pese a una incertidumbre considerable. Los instrumentos posteriores mejoraron algunos controles e introdujeron dependencias diferentes. El desarrollo histórico se entiende mejor a través de los cambios en los observables y los presupuestos de error que como una ceremonia en la que un experimento célebre acabó definitivamente con las dudas.

El resultado fue un nuevo criterio de explicación. Una teoría gravitatoria exitosa debía superar comprobaciones que examinaran aspectos diferentes de su estructura, con alternativas y supuestos de medición explícitos. Ese criterio reforzó la relatividad general y conservó preguntas que no podía resolver, entre ellas la relación entre la gravitación y la física cuántica.

Referencias

- [1] Will, C. M. "The Confrontation between General Relativity and Experiment." *Living Reviews in Relativity* 17, 4 (2014), introducción y secciones sobre desplazamiento al rojo y comprobaciones posnewtonianas. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>
- [2] Pound, R. V., y Rebka, G. A., Jr. "Apparent Weight of Photons." *Physical Review Letters* 4, 337–341 (1960). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>
- [3] Shapiro, I. I. "Fourth Test of General Relativity." *Physical Review Letters* 13, 789–791 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>

Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente

Dos explicaciones de la naturaleza pueden reproducir muchas de las mismas observaciones y, aun así, discrepar sobre una combinación de mediciones cuidadosamente elegida. El trabajo de Bell hizo explícita esa discrepancia para las correlaciones cuánticas. El debate sobre si la mecánica cuántica necesitaba una explicación más completa de los sucesos individuales adquirió una restricción matemática que los experimentos podían poner a prueba.

La ruptura no fue descubrir que todas las preguntas filosóficas se habían convertido en preguntas de laboratorio. Fue más limitada y más potente: ciertos supuestos sobre resultados producidos localmente implican restricciones sobre las correlaciones observables. La mecánica cuántica predice violaciones de esas restricciones. Por tanto, los supuestos, la predicción estadística y la realización experimental pueden examinarse por separado.

1. La correlación por sí sola nunca bastó

Los objetos correlacionados ordinarios no establecen un misterio cuántico. Dos sobres pueden contener respuestas opuestas fijadas durante su preparación. Abrir uno revela entonces qué contiene el otro, sin cambiar nada en el lugar distante. Observar resultados opuestos es compatible con esta explicación.

La dificultad aparece cuando los investigadores pueden elegir mediciones diferentes después de preparar un par. Una explicación local propuesta debe reproducir las correlaciones de

todas las combinaciones pertinentes de elecciones, no solo de una combinación conveniente. El artículo de Bell de 1964 formuló esta dificultad para el estado singlete de dos partículas de espín un medio. [1]

Bell no demostró que toda teoría con variables adicionales fuera imposible. Su artículo examina explícitamente una explicación de variables ocultas no local. Lo importante es la conjunción de supuestos que se pone a prueba. Tratar el resultado como una prohibición de pensar en una explicación física subyacente borra la estructura del teorema.

2. Una restricción que puede calcularse

Una formulación posterior útil es la desigualdad CHSH, llamada así por Clauser, Horne, Shimony y Holt, cuyo artículo de 1969 conectó el resultado de Bell con experimentos realizables. Supongamos que cada lado tiene dos ajustes posibles de medición y que cada resultado registrado es $+1$ o -1 . Escribamos los resultados asignados por un modelo determinista local como A , A' , B y B' . [2]

Para una asignación, consideremos $A(B + B') + A'(B - B')$. Como B y B' valen cada uno ± 1 , uno de los paréntesis es cero y el otro es ± 2 . La expresión debe ser, por tanto, $+2$ o -2 . Promediar sobre las asignaciones da una cota absoluta de 2 para la combinación correspondiente de correlaciones.

Este breve cálculo es una versión explicativa moderna de la cota, no una transcripción de la deducción de Bell de 1964. También revela un supuesto importante: al promediar las distintas combinaciones de ajustes se utiliza la misma distribución de estados subyacentes. Si esa distribución depende sin restricciones de las elecciones de medición, el argumento deja de establecer esta cota.

Pueden incluirse modelos estocásticos locales representando su aleatoriedad adicional en la especificación subyacente. Sustituir instrucciones deterministas por probabilidades locales no permite eludir el resultado. Sin embargo, las condiciones precisas siguen importando: deben declararse la localidad, los supuestos de independencia que relacionan preparación y elecciones, y el tratamiento de los sucesos registrados.

3. Por qué las predicciones cuánticas hacen interesante la cota

Para mediciones adecuadas sobre un par entrelazado, la mecánica cuántica predice una magnitud CHSH de $2\sqrt{2}$, aproximadamente 2,828. La distinción entre ese valor y 2 da al experimento algo definido que discriminar. No exige que un laboratorio observe de alguna manera cuatro mediciones incompatibles sobre la misma partícula a la vez.

En su lugar, muchos ensayos utilizan pares de ajustes diferentes. Las correlaciones observadas se componen a partir de esos ensayos. Para que esta composición ponga a prueba la desigualdad pretendida, las reglas de selección y clasificación de los ensayos no deben fabricar un subconjunto favorable. La cota matemática y las reglas prácticas para construir la muestra pertenecen a la misma explicación.

Una violación excluye la clase de modelos locales especificada bajo los supuestos experimentales. No selecciona una interpretación única de la mecánica cuántica. Tampoco identifica un mensaje controlable enviado de una estación a otra. Las correlaciones fuertes entre resultados conjuntos y la capacidad de elegir el resultado marginal distante son afirmaciones diferentes.

4. Las mejoras experimentales cambian qué objeciones permanecen

El experimento de Aspect, Dalibard y Roger de 1982 utilizó analizadores que cambiaban de ajuste durante el vuelo de los fotones. Abordaba la preocupación de que unos ajustes fijados con suficiente antelación permitieran una comunicación ordinaria que coordinara los resultados. El experimento supuso un paso importante, pero no debe describirse retrospectivamente como un diseño que cerraba todas las lagunas experimentales. [3]

La eficiencia de detección plantea otra dificultad. Si solo se observa un subconjunto de los pares emitidos, una explicación podría aprovechar las diferencias entre sucesos detectados y no detectados. Un control de localidad no resuelve automáticamente un problema de detección. A la inversa, una detección muy eficiente no establece automáticamente una separación espaciotemporal suficiente.

En 2015, Hensen y sus colaboradores presentaron una violación de una desigualdad de Bell utilizando espines electrónicos separados por 1,3 kilómetros, combinando en un experimento controles sobre las principales lagunas de localidad y detección. La afirmación publicada se refiere a un contraste estadístico con una muestra finita, no a una imposibilidad lógica establecida por un solo par de resultados. [4]

Llamar a un experimento «libre de lagunas» es, por tanto, una abreviatura con un alcance definido. Ningún experimento elimina la necesidad de confiar en todas las características de su funcionamiento, y ninguna etiqueta de ese tipo vuelve experimentalmente imposibles las correlaciones sin restricciones entre elecciones de medición y variables ocultas. La fuerza del resultado reside en los controles explícitos y la inferencia cuantificada, no en quedar exento de supuestos.

5. El cambio en lo que contaba como disputa científica

Una explicación subyacente podía parecer protegida por la afirmación de que sus variables eran inobservables. Los razonamientos del tipo de Bell muestran por qué esa protección puede fallar. No es necesario observar individualmente las variables si la estructura propuesta restringe la estadística de los resultados accesibles. La inobservabilidad de un mecanismo no garantiza la equivalencia observacional de las teorías.

La afirmación inversa es igualmente importante. Un desacuerdo entre interpretaciones no implica automáticamente una predicción experimental distinta. Si dos explicaciones reproducen las mismas probabilidades pertinentes, esta clase de experimento no las distingue. Describir toda interpretación como refutada o confirmada por los experimentos de Bell atribuye a la evidencia más de lo que puede respaldar.

El logro histórico fue una secuencia de transformaciones: una pregunta conceptual se convirtió en una desigualdad, una desigualdad en un diseño experimental y las debilidades experimentales en objetivos de nuevos diseños. Ni las matemáticas por sí solas ni los instrumentos por sí solos completaron la transición. El resultado perdurable es una explicación más precisa de qué supuestos pueden mantenerse juntos al confrontarse con correlaciones medidas.

Referencias

- [1] Bell, J. S. "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox." *Physics Physique Fizika* 1, 195–200 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- [2] Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., y Holt, R. A. "Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories." *Physical Review Letters* 23, 880–884 (1969). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880>

- [3] Aspect, A., Dalibard, J., y Roger, G. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers." *Physical Review Letters* 49, 1804–1807 (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- [4] Hensen, B., et al. "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres." *Nature* 526, 682–686 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature15759>

Las leyes deterministas dejan de garantizar la predicción práctica

Una ecuación determinista especifica cómo evoluciona un estado. No promete que ese estado pueda medirse con exactitud ilimitada ni que un pequeño error de medición siga siendo pequeño. Separar estas afirmaciones cambió lo que significaba comprender un sistema físico. Una ley podía seguir siendo definida mientras una predicción detallada dejaba de ser fiable.

No fue un único descubrimiento que derribara una creencia universalmente aceptada en la predicción perfecta. Los trabajos matemáticos anteriores ya habían puesto de manifiesto dificultades en el comportamiento de las trayectorias. El desarrollo posterior de la investigación del caos concretó esas dificultades en modelos relativamente sencillos e hizo de la propia sensibilidad un objeto de cálculo.

1. La condición ausente en una promesa de predicción

La discusión del azar de Poincaré en *Science et méthode* distinguía la dependencia exacta de las condiciones iniciales de la predictibilidad práctica. Describía cómo una pequeña discrepancia inicial podía convertirse en una gran discrepancia posterior. Su importancia reside en el carácter condicional de la predicción: conocer aproximadamente el presente permite conocer aproximadamente el futuro solo cuando la dinámica conserva la exactitud pertinente. [1]

Un sistema estable conocido ayuda a aclarar el contraste. Dos desplazamientos iniciales ligeramente distintos de un oscilador amortiguado pueden converger hacia el mismo estado de reposo. La incertidumbre inicial importa entonces cada vez menos para

una pregunta sobre su posición final. El determinismo por sí solo no establecía esa convergencia; lo hacía la dinámica particular.

Imaginemos ahora una evolución que estira repetidamente una pequeña región de estados posibles. Aunque cada estado exacto tenga un futuro único, el conjunto de futuros permitido por la incertidumbre inicial puede extenderse. El investigador no ha perdido la regla que gobierna el sistema. Esa regla ha transformado una incertidumbre observacional modesta en una limitación predictiva importante.

2. Un pequeño modelo atmosférico con una dificultad inesperada

El artículo de Lorenz de 1963 estudió un conjunto de ecuaciones diferenciales deterministas motivadas por la convección. Sus soluciones numéricas mostraban un comportamiento acotado y no periódico sensible a pequeños cambios del estado inicial. Era un sistema matemático deliberadamente reducido, no un modelo operativo completo de la atmósfera. [2]

Esta distinción importa en ambos sentidos. Como el sistema era pequeño, no podía atribuirse sin más su comportamiento irregular a un inventario enorme de causas externas desconocidas. Pero, como era reducido, tampoco podía asignarse directamente su comportamiento numérico preciso al tiempo atmosférico real. Establecía una posibilidad y un mecanismo en un modelo especificado.

El ordenador no era simplemente una calculadora más rápida de una respuesta conocida. La integración repetida permitía examinar trayectorias durante intervalos en los que se hacía visible la divergencia. Sin embargo, el cálculo numérico también introducía una pregunta que cualquier interpretación convincente

debía afrontar: ¿la irregularidad era una propiedad de las ecuaciones o un artefacto de la aproximación y el redondeo?

Un gráfico aparentemente errante no basta para responder. Hay que examinar la estabilidad, los métodos numéricos y la geometría de la evolución. El avance conceptual consistió en investigar la irregularidad dentro del sistema determinista, en vez de suponer de antemano que debía representar una entrada aleatoria ausente.

3. Qué dice una estimación del crecimiento del error

Como ilustración local sencilla, supongamos que una pequeña incertidumbre crece aproximadamente como $\delta(t) = \delta(0) \exp(\lambda t)$, con λ positivo. Esta expresión es una aproximación en un régimen donde la separación exponencial resulta una descripción útil. No es una ley universal de cualquier perturbación en cualquier momento.

Si el error máximo útil es Δ , el horizonte de predicción resultante es aproximadamente $\ln[\Delta/\delta(0)]/\lambda$. Mejorar la medición inicial ayuda, pero en este modelo el beneficio es logarítmico. Reducir el error inicial por un factor de diez añade $\ln(10)/\lambda$ al horizonte; no multiplica ese horizonte por diez.

Para los valores ilustrativos $\lambda = 0,5$ por día y una razón entre tolerancia y error inicial de 100, el horizonte es de unos 9,21 días. Mejorar diez veces la precisión inicial hace que la razón sea 1 000 y el horizonte de unos 13,82 días. Son valores hipotéticos, no constantes estimadas del tiempo atmosférico terrestre.

El cálculo separa tres contribuciones a una predicción: la incertidumbre al inicializarla, la rapidez con la que crece y la exactitud que requiere el uso previsto. No existe un horizonte único independiente de la pregunta. Predecir una distribución

amplia de probabilidades puede seguir siendo útil después de que una trayectoria precisa haya perdido su utilidad.

4. Las reglas sencillas no tienen por qué producir un comportamiento sencillo a largo plazo

La discusión de May de 1976 sobre ecuaciones en diferencias no lineales mostró por qué una relación de recurrencia breve no tiene por qué producir un catálogo breve de comportamientos. Según sus parámetros, una aplicación sencilla puede acercarse a un punto fijo, recorrer cíclicamente varios valores o mostrar comportamiento caótico. [3]

Consideremos la aplicación logística ilustrativa $x_{\text{next}} = r x(1 - x)$, con x entre cero y uno y un r positivo adecuado. La fórmula es determinista: si se le da un valor actual y un parámetro exactos, devuelve un único valor siguiente. Ese hecho no nos dice si valores iniciales próximos siguen próximos ni si una iteración prolongada converge a un punto fijo.

La aplicación no constituye evidencia de que toda población siga una recurrencia logística, y mucho menos de que todo desarrollo social sea caótico. Aplicarla a un sistema real requiere justificar la variable de estado, el intervalo de actualización y los procesos omitidos. Una demostración útil de posibilidad matemática puede resultar engañosa si se convierte en una explicación universal sin apoyo.

5. Irregularidad, aleatoriedad y evidencia

El caos determinista no es la misma afirmación que la aleatoriedad cuántica. Uno se refiere al comportamiento de trayectorias generadas por una dinámica especificada; la otra, a la estructura probabilística y la interpretación de los resultados cuánticos.

Llamar impredecibles a ambos no vuelve intercambiables sus mecanismos.

Tampoco puede clasificarse toda serie temporal experimental irregular como caótica por su aspecto. El ruido de medición, un forzamiento externo cambiante y un modelo inadecuado pueden generar registros complicados. La evidencia de caos determinista requiere más que el parecido con un gráfico célebre. La dinámica propuesta debe explicar características que las explicaciones rivales no expliquen igualmente.

El caos también deja algunas preguntas abordables. Un sistema puede tener una descripción estadística útil aunque sus trayectorias individuales diverjan rápidamente. El fracaso de un tipo de predicción puede motivar otro, siempre que las regularidades estadísticas se establezcan en vez de suponerse.

6. La nueva obligación explicativa

Después de este cambio conceptual, presentar una ecuación determinista ya no bastaba para justificar una predicción indefinidamente detallada. El investigador debía explicar también la incertidumbre inicial, la estabilidad, la aproximación y el observable predicho. La ley y la predicción se habían convertido en logros distintos.

Esto no redujo la explicación a la impotencia. La hizo más específica. Una teoría exitosa podía describir por qué fallan las predicciones detalladas, cómo cambia su horizonte útil y qué propiedades más generales siguen siendo predecibles. La ruptura importante fue perder una garantía injustificada y, a la vez, adquirir nuevas formas de calcular los límites del conocimiento.

Referencias

- [1] Poincaré, H. *Science et méthode* (1908), libro I, capítulo IV, “Le hasard.” https://fr.wikisource.org/wiki/Science_et_m%C3%A9thode
- [2] Lorenz, E. N. “Deterministic Nonperiodic Flow.” *Journal of the Atmospheric Sciences* 20, 130–141 (1963). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2)
- [3] May, R. M. “Simple mathematical models with very complicated dynamics.” *Nature* 261, 459–467 (1976). <https://doi.org/10.1038/261459a0>

De los infinitos electrodinámicos a las escalas de Wilson

Un infinito en un cálculo no es un resultado experimental. Es una advertencia de que la relación entre una descripción matemática y una magnitud medida todavía no está bajo control. En la teoría de campos del siglo XX, la renormalización pasó de ser una manera de obtener predicciones finitas en una teoría difícil a convertirse en una forma más amplia de investigar cómo cambian las descripciones con la escala.

Ese desarrollo no siguió una línea recta desde un truco embarazoso hasta una interpretación final inevitable. Los problemas de la electrodinámica cuántica y los problemas próximos a los puntos críticos termodinámicos surgieron en contextos experimentales distintos. Su conexión posterior cambió las preguntas que los físicos podían plantear a una teoría, además de las técnicas disponibles para responderlas.

1. Una discrepancia suficientemente pequeña para medirla y suficientemente grande para importar

El problema de finales de la década de 1940 no consistía solo en que los cálculos contuvieran infinitos. Las mediciones atómicas también exigían correcciones pequeñas y definidas de las predicciones más sencillas. El artículo de Bethe de 1947 calculó una contribución electromagnética al desplazamiento de los niveles de energía del hidrógeno. Utilizó un tratamiento aproximado, en lugar de una solución relativista completa. [1]

La lógica de ese cálculo depende de distinguir una diferencia de energía observable de un parámetro antes de relacionarlo con la medición. Una fórmula puede contener tanto una corrección como

una magnitud denominada masa del electrón. A menos que se especifique la relación de esta última con la masa medida experimentalmente, añadir la corrección puede contar dos veces parte del mismo efecto físico.

Por eso, restar una contribución divergente no es automáticamente legítimo ni ilegítimo. La pregunta es qué se ha definido, qué se ha medido y qué relaciones conservan capacidad predictiva después de esas definiciones. Una sustracción arbitraria ajustada por separado a cada observación explicaría poco. Una prescripción coherente que fije un pequeño conjunto de magnitudes puede restringir muchos otros resultados.

2. La precisión permitió poner a prueba un programa de cálculo

El cálculo de Schwinger de 1948 abordó otro observable: el momento magnético del electrón. Su corrección principal al resultado más sencillo de Dirac se expresa mediante el coeficiente del momento anómalo $\alpha/(2\pi)$, donde α es la constante de estructura fina. Esto conectó el tratamiento teórico con una desviación finita y medible, en lugar de con un infinito considerado de forma aislada. [2]

La aproximación ilustrativa $\alpha = 1/137$ da $\alpha/(2\pi) \approx 0,001162$. Esta es la contribución principal a la anomalía adimensional $(g - 2)/2$, no la predicción moderna completa ni el valor de g . Confundir esta anomalía con $g - 2$ produciría un error de un factor dos. Confundirla con g , aproximadamente 2,002323 a este orden, sería un error distinto y mucho mayor.

Quedan por calcular términos de orden superior. El acuerdo a un orden no demuestra la convergencia de la serie perturbativa ni su completitud a distancias arbitrariamente pequeñas.

3. Más de una vía hacia las mismas predicciones

En su conferencia Nobel de 1965, Tomonaga describe el trabajo de su grupo junto al de Schwinger y Feynman, y la demostración de Dyson de que el procedimiento de renormalización trata las divergencias hasta órdenes perturbativos arbitrariamente altos. Es un relato retrospectivo de un participante, valioso por su descripción del programa técnico, pero no un recuento neutral de todas las respuestas contemporáneas. [3]

El logro de 1947–1949 fue un tratamiento sistemático que iba más allá de una corrección especialmente elegida. La coherencia relativista y la organización del cálculo importaban porque la misma teoría debía sustentar múltiples predicciones.

Resulta engañoso describirlo únicamente como una decisión de los físicos de ignorar el infinito. La regularización introduce una prescripción intermedia controlada; la renormalización relaciona parámetros y predicciones con condiciones físicas especificadas. Si el regulador puede eliminarse, y en qué sentido, es otra pregunta. Mantener separadas estas operaciones explica por qué el éxito podía coexistir con la preocupación por los fundamentos.

4. La pregunta intermedia que faltaba: ¿qué carga y a qué escala?

Las predicciones finitas no pusieron fin a la pregunta de cómo se definía una teoría renormalizada. En 1953, Stueckelberg y Petermann trataron las transformaciones entre distintas reparametrizaciones finitas de la QED. Wilson identifica ese trabajo como una formulación temprana del grupo de renormalización. Una teoría podía representarse mediante distintas elecciones de parámetros sin que esas elecciones constituyeran teorías físicas diferentes. [4]

El artículo de Gell-Mann y Low de 1954 investigó la QED a distancias pequeñas. Relacionaron el comportamiento de las funciones de propagación a momentos grandes con las constantes de renormalización y examinaron la distribución de carga alrededor de una carga de prueba. El problema no era otra corrección atómica aislada: concernía a cómo se comporta la misma teoría cuando cambia la distancia investigada. [5]

Wilson explica la conexión en términos de una familia de parámetros de carga definidos a distintas escalas de momento, relacionados por una ecuación diferencial. Identifica esa ecuación como una predecesora de la suya. La conexión atañe, por tanto, a la transformación entre descripciones de una teoría, no a una semejanza entre dos usos de la palabra «renormalización». [4]

Esto hizo productiva una ambigüedad en la parametrización. En lugar de preguntar únicamente qué valor finito debía sustituir a un parámetro desnudo, se podía preguntar cómo se relacionan los valores definidos a distintas escalas de referencia. Las predicciones físicas deben relacionarse de manera coherente entre esas elecciones. Una carga medida a gran distancia no puede tratarse sin más como un dato de entrada no examinado a cualquier distancia menor.

5. Un problema de teoría de campos se encuentra con los fenómenos críticos

La trayectoria de Wilson comenzó en la teoría de campos de partículas. En su relato retrospectivo, un modelo dividido en franjas de momento bien separadas le permitió eliminar una franja de alta energía y obtener un hamiltoniano modificado para las restantes. Esa construcción proporcionó una base concreta para la renormalización sucesiva. Su encuentro con la descripción de

escala de Kadanoff de 1966 conectó después ese trabajo con los fenómenos críticos. [4]

El artículo de 1971 desarrolló explícitamente la descripción de Kadanoff mediante métodos del grupo de renormalización. Los fenómenos críticos proporcionaban un contexto en el que las fluctuaciones a muchas escalas debían tratarse conjuntamente, en lugar de como una pequeña corrección de una descripción media. La transformación del modelo se convirtió en un objeto de cálculo. [6]

Estas etapas no deben fundirse en un único descubrimiento. Cambiar parametrizaciones finitas de la QED, estudiar el comportamiento a distancias pequeñas y eliminar grados de libertad de un modelo son operaciones relacionadas que parten de problemas diferentes. Su conexión histórica es más sólida cuando esas diferencias permanecen visibles. Se debilita cuando todo el desarrollo se cuenta como una lección genérica según la cual las escalas grandes y pequeñas tienen aspectos distintos.

La explicación conceptual de los puntos fijos y la universalidad corresponde a IDE-006. Aquí, el cambio importante es el desplazamiento de una pregunta técnica entre contextos de investigación: ¿cómo cambia, al modificar la resolución, el conjunto de parámetros e interacciones que deben conservarse? El problema anterior de la QED aportó parte del linaje matemático; los fenómenos críticos convirtieron la transformación de escala en una vía sistemática hacia nuevas predicciones.

6. Qué cambió en las exigencias de la explicación

Las relaciones entre parámetros desnudos y medidos, entre escalas de renormalización y entre modelos efectivos sucesivos son distintas. Su conexión histórica no fue ni un único truco de sustracción ni una invención repentina en 1971.

Los cálculos atómicos finitos siguen siendo evidencia importante del programa anterior. El análisis posterior de escala añadió una manera de investigar por qué una descripción funciona en un intervalo y cómo deben cambiar sus parámetros cuando cambia ese intervalo. No estableció la convergencia de toda expansión perturbativa ni convirtió toda teoría divergente en una teoría coherente.

La ruptura fue, por tanto, un cambio en lo que podía estudiarse: la dependencia de una descripción teórica respecto de su escala podía convertirse en un problema organizado. El relato de Wilson como participante documenta una vía de acceso a ese problema. No debe confundirse con evidencia de que todos sus contemporáneos entendieran el desarrollo de la misma manera o lo aceptaran de inmediato.

Referencias

- [1] Bethe, H. A. "The Electromagnetic Shift of Energy Levels." *Physical Review* 72, 339–341 (1947). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.339>
- [2] Schwinger, J. "On Quantum-Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron." *Physical Review* 73, 416–417 (1948). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.416>
- [3] Tomonaga, S. "Development of Quantum Electrodynamics." Conferencia Nobel (1965). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/tomonaga/lecture/>
- [4] Wilson, K. G. "The Renormalization Group and Critical Phenomena." Conferencia Nobel (1982). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1982/wilson/lecture/>
- [5] Gell-Mann, M., y Low, F. E. "Quantum Electrodynamics at Small Distances." *Physical Review* 95, 1300–1312 (1954). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.1300>
- [6] Wilson, K. G. "Renormalization Group and Critical Phenomena. I. Renormalization Group and the Kadanoff Scaling Picture." *Physical Review B* 4, 3174–3183 (1971). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.4.3174>

Genes discretos y variación continua: una reconciliación estadística

La estatura humana varía a lo largo de una escala aparentemente continua. Sin embargo, los factores hereditarios pueden transmitirse como alternativas discretas. Reconciliar estas observaciones exigía más que elegir un ganador entre dos descripciones. Exigía mostrar cómo un nivel de organización podía generar el patrón estadístico observado en otro.

El cambio conceptual consistió en tratar una distribución de rasgos medidos como algo explicable mediante combinaciones de efectos heredados, contribuciones ambientales y supuestos explícitos. La transmisión discreta ya no implicaba un número pequeño de categorías visibles claramente separadas. A la inversa, una distribución de aspecto continuo ya no establecía que el propio material hereditario se mezclara.

1. Dos tipos de evidencia y una contradicción aparente

Las investigaciones biométricas medían la variación continua y el parecido entre parientes. Las investigaciones mendelianas examinaban la segregación de los factores hereditarios. A principios del siglo XX, la discrepancia concernía a si el primer tipo de observaciones podía reconciliarse con el segundo. Ninguno de los enfoques carecía simplemente de pensamiento cuantitativo. Cuantificaban objetos distintos. [1]

Resulta especialmente engañoso atribuir a todos los investigadores anteriores una misma creencia uniforme en la herencia por mezcla. Las posiciones históricas eran más variadas, y los intentos

de reconciliación precedieron al artículo de Fisher de 1918. Pearson, Yule y Weinberg ya habían contribuido al problema. El trabajo de Fisher se convirtió en una formulación importante de la reconciliación estadística, no en un argumento surgido en un campo vacío. [1]

El contraste observacional puede enunciarse sin repetir los cruces conocidos. Un factor con dos alternativas puede tener una regla discreta de transmisión. Un fenotipo medido puede depender de muchos de esos factores. La inferencia que pasa de «cada contribución es discreta» a «la distribución resultante debe tener pocas categorías» no es válida.

2. Construir continuidad a partir de contribuciones discretas

Consideremos un modelo ilustrativo con diez loci heredados de forma independiente. En cada locus, un individuo lleva dos copias, cada una de las cuales aporta cero o una unidad a un rasgo. Supongamos frecuencias iguales, combinación aleatoria, efectos aditivos iguales y ausencia de ligamiento. La contribución genética total va entonces de cero a veinte unidades.

Hay muchas más maneras de obtener un total intermedio que un total extremo. Bajo estos supuestos deliberadamente sencillos, el total sigue una distribución binomial con veinte ensayos y probabilidad de un medio. Su media es 10 y su varianza es 5. Un total extremo concreto tiene probabilidad $1/1\,048\,576$, mientras que el total central tiene probabilidad $184\,756/1\,048\,576$, aproximadamente 0,1762.

Estas son propiedades de un modelo construido, no mediciones de la estatura humana ni recuentos de genes de la estatura. Un mayor número de loci, efectos desiguales y variación ambiental pueden difuminar aún más las categorías visibles. El ejemplo

establece la compatibilidad entre la herencia discreta y una distribución que puede parecer cada vez más continua. No establece que todo rasgo cuantitativo real tenga exactamente esta arquitectura.

Los efectos ambientales pueden incluirse como una contribución separada. Pero añadir un término residual no constituye por sí solo una explicación biológica completa del ambiente. Es una decisión de descomposición que debe relacionarse con cómo se realizaron las observaciones y qué influencias representa realmente el modelo.

3. El parecido se convierte en un problema de covarianza

El artículo de Fisher de 1918 abordó las correlaciones entre parientes bajo herencia mendeliana. Esto va más allá de demostrar que muchas contribuciones discretas pueden generar una distribución continua. Los parientes comparten conexiones hereditarias, por lo que los valores de sus rasgos pueden covariar de formas que predice un modelo genético. El artículo también trató complicaciones como la dominancia y el apareamiento selectivo. [2]

Supongamos que, en un modelo poblacional simplificado, el fenotipo se representa como un valor genético aditivo más un residuo ambiental. Su varianza solo es igual a la varianza genética más la ambiental si su covarianza es cero. En caso contrario, la descomposición contiene también el doble de esa covarianza. Escribir una ecuación compacta no elimina la necesidad de justificar el supuesto de independencia.

Del mismo modo, el parecido entre parientes no es automáticamente una medida pura de lo que comparten genéticamente. Los parientes pueden compartir ambientes y los patrones de apareamiento pueden afectar a las asociaciones

genéticas. Una reconciliación estadística permite analizar estos problemas; no los suprime.

El avance consistió en preguntar si un conjunto de supuestos podía explicar conjuntamente la variación dentro de una población y el parecido entre distintos tipos de parentesco. Una explicación ganaba fuerza al superar varias de esas restricciones. Ajustar una sola correlación dejaría disponibles más alternativas.

4. Una varianza no es un porcentaje de una persona

Este marco favoreció un nuevo lenguaje de componentes de la variación. Es fácil utilizarlo mal. Una afirmación sobre la proporción de varianza asociada con diferencias genéticas aditivas en una población especificada no significa que los genes hayan fabricado esa misma proporción del cuerpo de un individuo.

La varianza describe diferencias respecto de la media poblacional. Su magnitud depende de la población y de las condiciones. Si una fuente ambiental de variación se vuelve más uniforme, la contribución relativa de la variación genética puede aumentar aunque la biología de ningún individuo haya pasado a depender menos del ambiente.

Una contribución genética elevada a la variación observada tampoco implica inmutabilidad. Un cambio aplicado de forma amplia a una población puede alterar la media y dejar intacta buena parte del orden relativo de los individuos. El modelo de las diferencias existentes y la predicción de una intervención son preguntas relacionadas, pero una no sustituye a la otra.

Esta distinción puede hacerse sin suponer que genes y ambientes actúan como ingredientes físicamente separables. Una aproximación estadística aditiva puede ser útil aunque los mecanismos de desarrollo subyacentes impliquen interacciones.

Su adecuación para una inferencia concreta debe comprobarse respecto de esa inferencia.

5. Lo que la reconciliación dejó abierto

La reconciliación no redujo toda la herencia a proporciones mendelianas sencillas. El ligamiento, la dominancia, las interacciones, los ambientes compartidos y los distintos sistemas de apareamiento pueden alterar las relaciones estadísticas. Tampoco reveló la identidad molecular de cada factor contribuyente. Mostró cómo una clase de mecanismos hereditarios podía explicar una clase de patrones poblacionales.

El trabajo genómico moderno permite observar algunas de esas diferencias contribuyentes a una escala inaccesible en 1918. Aun así, el logro histórico debe juzgarse por el problema que se abordaba entonces: la incompatibilidad aparente entre la variación fenotípica continua y la herencia particulada. Proyectar los detalles moleculares posteriores sobre el modelo original oscurecería lo que se estableció y lo que no.

6. Una relación distinta entre mecanismo y patrón

La ruptura duradera fue un cambio en la relación entre una regla de transmisión individual y un patrón entre muchos individuos. Esas descripciones ya no tenían que competir como explicaciones mutuamente excluyentes. Una teoría estadística podía conectarlas y, al mismo tiempo, hacer visibles los supuestos necesarios para esa conexión.

La conexión también creó nuevas obligaciones. Hay que especificar la población, los parentescos, la estructura ambiental y la magnitud estimada. El resultado no es un número universal que explique la herencia. Es un marco en el que una discrepancia sobre

el parecido observado puede convertirse en una discrepancia sobre modelos explícitos y contrastables.

Referencias

- [1] Visscher, P. M., y Goddard, M. E. "From R.A. Fisher's 1918 Paper to GWAS a Century Later." *Genetics* 211, 1125–1130 (2019). <https://doi.org/10.1534/genetics.118.301594>
- [2] Fisher, R. A. "The Correlation between Relatives on the Supposition of Mendelian Inheritance." *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 52, 399–433 (1918). <https://digital.library.adelaide.edu.au/items/5ed47714-2635-4af9-8409-cf7eb6f87c3b>

Descifrar el código genético: de 1954 a 1966

Saber que una secuencia puede portar información hereditaria no nos dice cómo especifica una proteína. Cuatro tipos de nucleótidos y veinte aminoácidos comunes plantean un problema de correspondencia. Contar las disposiciones posibles puede restringir una respuesta, pero no determina qué disposición se asigna a cada aminoácido ni cómo realiza la célula esa asignación.

Entre 1954 y 1966, ese problema se volvió abordable experimentalmente. Las propuestas sobre la estructura del código se contrastaron con mutaciones, síntesis sin células, secuencias cortas de ARN y moldes preparados químicamente. Se pasó de patrones plausibles a asignaciones distinguidas experimentalmente, con varios métodos que aportaban distintas partes de la respuesta.

1. Una posibilidad combinatoria todavía no es un código

La propuesta de Gamow de 1954 relacionaba la estructura del ADN con posibles disposiciones que especificaran aminoácidos. Su importancia histórica reside en parte en hacer explícita la pregunta por la codificación. No debe presentarse como el mecanismo de traducción establecido experimentalmente. Un esquema geométrico puede ser ingenioso y, aun así, fallar como descripción de lo que hacen las células. [1]

El argumento elemental de recuento es útil, pero limitado. Cuatro símbolos dan cuatro unidades de un símbolo, dieciséis pares ordenados y sesenta y cuatro tripletes ordenados. Si deben representarse veinte asignaciones distintas de aminoácidos mediante unidades de longitud fija, los pares son insuficientes y

los tripletes bastan en número. Esa aritmética no demuestra que la naturaleza utilice tripletes.

Tampoco decide si las unidades se solapan, si hay separadores, dónde comienza la lectura o si unidades distintas pueden especificar el mismo aminoácido. Son preguntas estructurales adicionales. Un código no se descifra al advertir que una capacidad numérica supera a otra.

2. Las mutaciones ponen a prueba la organización de la lectura

El trabajo de Crick, Barnett, Brenner y Watts-Tobin de 1961 utilizó mutaciones y combinaciones de mutaciones para inferir propiedades generales del código. La recuperación de la función con determinadas combinaciones de adiciones y deleciones respaldaba la lectura en grupos sucesivos de tres. Era evidencia genética sobre la organización, no un diccionario completo de tripletes individuales. [2]

Una secuencia explicativa hace visible la lógica. Supongamos que un lector agrupa los símbolos como ABC DEF GHI JKL. Si se inserta un símbolo cerca del principio, cambian todas las agrupaciones posteriores. Si se elimina otro más adelante, puede restablecerse la agrupación original a partir de ese punto, aunque el segmento intermedio siga alterado. Añadir tres símbolos también puede conservar la agrupación posterior y cambiar el contenido local.

Esto ilustra la lógica del marco de lectura; no es una de las secuencias reales ni una de las mediciones fenotípicas del experimento. La interpretación real exigía atender a qué combinaciones de mutantes restauraban la función y qué mecanismos alternativos podían explicar el patrón. Recuperar la

función es una consecuencia observable a partir de la cual se infiere la organización de la secuencia.

3. Un molde sintético proporciona una asignación química

Los experimentos de Nirenberg y Matthaei de 1961 suministraron polirribonucleótidos sintéticos a un sistema de síntesis de proteínas sin células. El ácido poliuridílico, formado por nucleótidos de uracilo repetidos, dirigió la producción de un producto rico en fenilalanina. Junto con la interpretación emergente en tripletes, esto proporcionó una asignación de UUU a la fenilalanina. [3]

La preparación sin células importaba porque separaba una operación bioquímica específica de toda la complejidad de una célula viva. Los investigadores podían cambiar el ARN añadido y medir la incorporación a un producto. Un molde se convirtió en una entrada experimental, en lugar de ser únicamente un mensaje hipotético inferido de la herencia.

Pero la repetición de un solo símbolo deja muchas preguntas intactas. No establece todas las asignaciones, no distingue todas las posiciones iniciales posibles ni explica el aparato completo. El resultado es potente porque su alcance es específico: en las condiciones estudiadas, ese ARN sintético cambió qué aminoácido se incorporaba a un polipéptido.

4. Moldes más informativos requieren una química más informativa

Los polímeros sintéticos mixtos podían restringir las asignaciones mediante su composición, pero una mezcla conocida de bases no equivale a un orden conocido de bases. Distintos tripletes pueden contener las mismas cantidades de cada nucleótido. Por tanto, una

asociación estadística entre composición e incorporación de aminoácidos puede dejar ambigüedades de orden.

El programa de Khorana utilizó polinucleótidos con secuencias repetitivas definidas para hacer más informativa la entrada. Su conferencia Nobel de 1968 describe retrospectivamente ese trabajo. El avance pertinente fue el control de los patrones de secuencia, que permitía distinguir asignaciones candidatas mediante lo que producían los moldes. [4]

Por ejemplo, un patrón de dos símbolos repetido indefinidamente puede leerse en tripletes alternos. Un patrón repetido de tres símbolos permite tres marcos iniciales posibles. Estos casos contruidos muestran por qué las salidas deben interpretarse junto con la periodicidad del molde y las posibles posiciones de inicio. Una entrada químicamente ordenada puede seguir generando más de una lectura candidata.

Los ensayos de unión con tripletes cortos aportaron otro tipo de restricción: se podía estudiar el efecto de un triplete sobre la asociación de un ARN de transferencia aminoacilado con los ribosomas. La conferencia Nobel de Nirenberg describe cómo estos ensayos complementaban los experimentos de síntesis de proteínas. La unión y la síntesis completada son observables distintos, por lo que su concordancia informa más que la mera repetición de una medición. [5]

5. Convergencia sin un único experimento decisivo

A mediados de la década de 1960, el problema de las asignaciones se estaba resolviendo mediante la combinación de estos métodos. Las alteraciones genéticas restringían cómo se agrupaba el mensaje; los moldes sintéticos conectaban patrones de ARN con productos; los experimentos de unión ponían a prueba

asociaciones de tripletes individuales. Ninguno proporcionaba por sí solo todas las partes del mecanismo. [4,5]

Esta división del trabajo experimental también explica por qué la historia no debe organizarse como una carrera ganada por una persona. Preparar materiales, mantener sistemas bioquímicos activos, diseñar patrones de secuencia e interpretar combinaciones de mutantes eran contribuciones distintas a un problema inferencial común. La cadena de evidencia informa más que una lista de premios.

El resultado no mostró que la secuencia opere con independencia de la maquinaria. Los ARN de transferencia, las enzimas, los ribosomas y los procesos de inicio y terminación hacen físicamente efectiva la correspondencia. Una tabla impresa describe asignaciones regulares; no es un agente causal que se traduzca a sí mismo.

6. Lo que el desciframiento hizo posible

La ruptura conceptual fue la sustitución de una especulación sobre la codificación sin restricciones por relaciones entre secuencia y síntesis restringidas experimentalmente. Una asignación propuesta podía ahora cuestionarse cambiando un molde, examinando una mutación o comparando ensayos distintos. El código se convirtió en algo que podía investigarse relación por relación.

Ese logro también creó nuevas preguntas. ¿Cómo se realizan las asignaciones con suficiente fidelidad? ¿Cómo se reconocen los inicios y los finales? ¿Por qué tiene esa organización la correspondencia? Establecer un diccionario no respondió a todas esas preguntas, pero las transformó: dejaron de ser exigencias sobre una correspondencia desconocida y pasaron a ser

investigaciones de una correspondencia con estructura establecida experimentalmente.

Referencias

- [1] Gamow, G. "Possible Relation between Deoxyribonucleic Acid and Protein Structures." *Nature* 173, 318 (1954). <https://doi.org/10.1038/173318a0>
- [2] Crick, F. H. C., Barnett, L., Brenner, S., y Watts-Tobin, R. J. "General Nature of the Genetic Code for Proteins." *Nature* 192, 1227–1232 (1961). <https://doi.org/10.1038/1921227a0>
- [3] Nirenberg, M. W., y Matthaei, J. H. "The dependence of cell-free protein synthesis in *E. coli* upon naturally occurring or synthetic polyribonucleotides." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 47, 1588–1602 (1961). <https://doi.org/10.1073/pnas.47.10.1588>
- [4] Khorana, H. G. "Nucleic Acid Synthesis in the Study of the Genetic Code." Conferencia Nobel (1968). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1968/khorana/lecture/>
- [5] Nirenberg, M. W. "The Genetic Code." Conferencia Nobel (1968). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1968/nirenberg/lecture/>

Evolución sin una explicación adaptativa para cada cambio

La evidencia molecular disponible en la década de 1960 hizo más que añadir pequeños detalles a la historia evolutiva. Proporcionó recuentos de cambios en proteínas, y esos recuentos podían extrapolarse a una tasa de sustitución. La pregunta era si una población podía sostener esa tasa cuando cada sustitución exigía un episodio separado de selección favorable.

El argumento de Kimura de 1968 unió esa nueva evidencia a un cálculo anterior del coste de la selección. Reconstruir la conexión importa porque la fórmula de la tasa neutral no explica por sí sola por qué se propuso la neutralidad como solución. También es necesario distinguir un argumento históricamente influyente de un cálculo cuyos supuestos deban aceptarse hoy sin volver a examinarlos.

1. El argumento histórico sobre la tasa

El artículo de Haldane de 1957 consideró el coste reproductivo de sustituir un alelo por otro mediante selección. En su modelo, la pérdida selectiva acumulada durante una sustitución podía ser grande aunque la desventaja en una generación concreta fuera pequeña. Propuso un límite ilustrativo de aproximadamente una sustitución por cada 300 generaciones bajo sus supuestos. No era un límite empírico universal de velocidad para cualquier población. [1]

El coste era un problema de balance poblacional. No puede suponerse que eliminar repetidamente alternativas menos exitosas, mediante diferencias de supervivencia o reproducción, deje una capacidad reproductiva ilimitada para otras sustituciones

simultáneas. Importa el déficit acumulado respecto del tipo favorecido, no solo la ventaja en una generación. La conversión de ese déficit en una tasa sostenible depende del modelo biológico.

Kimura estimó una tasa mucho mayor para el conjunto del genoma a partir de comparaciones de un pequeño grupo de proteínas: aproximadamente una sustitución de un par de nucleótidos cada dos años en la evolución de los mamíferos. Contrastó esa extrapolación con el cálculo de Haldane. Si cada sustitución conllevaba el coste selectivo supuesto, argumentó, la carga resultante sería intolerable. La sustitución neutral o casi neutral ofrecía una manera de evitar atribuir ese coste a cada cambio. [2]

La estructura condicional es la premisa histórica: una tasa inferida elevada, junto con un coste atribuido a las sustituciones ventajosas, creaba un conflicto bajo esos supuestos. La neutralidad se propuso como solución. El argumento no consistía simplemente en que existieran muchas diferencias o en que los organismos contuvieran cambios sin finalidad imaginable.

2. Por qué mutación y sustitución son recuentos distintos

Una mutación es un cambio nuevo en una secuencia. Una sustitución, en este sentido de la genética de poblaciones, es un cambio que se fija en una población. La mayoría de las mutaciones nuevas no tienen por qué convertirse en sustituciones. Confundir ambas tasas eliminaría el proceso poblacional que la teoría pretende explicar.

Consideremos la siguiente derivación idealizada. Una población diploide con N individuos contiene $2N$ copias de un locus autosómico. Si la tasa de mutación neutral por copia y generación es μ , surgen aproximadamente $2N\mu$ mutaciones neutrales nuevas

por generación. Bajo el modelo neutral más sencillo, una variante nueva presente en una sola copia tiene probabilidad $1/(2N)$ de fijarse finalmente.

Multiplicar la aportación de mutaciones por la probabilidad de fijación da una tasa esperada de sustitución a largo plazo de μ . Los términos del tamaño poblacional se cancelan. Es un resultado de modelo bajo supuestos declarados, no una medición que demuestre que todos los sitios son neutrales. Ayuda a explicar por qué una tasa de sustitución molecular no tiene por qué medir directamente una mejora adaptativa.

Con los valores ilustrativos $N = 10\,000$ y $\mu = 0,000001$, la entrada esperada es de 0,02 mutaciones neutrales nuevas por generación en el locus modelizado. Multiplicar por $1/20\,000$ da una tasa de sustitución de 0,000001 por generación. Una población mayor aporta más mutaciones, pero da a cada nueva copia neutral una probabilidad menor de fijación. Estos datos inventados no son estimaciones del artículo de Kimura.

3. Qué resuelve la cancelación y qué no

El cálculo de la tasa explica una consecuencia de la neutralidad exacta: una probabilidad baja de fijación puede compensar una entrada elevada de variantes. El argumento del coste explica por qué se recurrió a ese proceso en 1968. Invertir ese orden haría parecer que el álgebra del modelo era la evidencia que lo había exigido originalmente.

Kimura conectó la probabilidad de fijación con la frecuencia inicial y utilizó esa conexión para relacionar la entrada de mutaciones con la sustitución. El cálculo cambió, por tanto, qué recuento importaba. Un recuento de diferencias entre linajes no tiene por qué ser también un recuento de sustituciones adaptativas exitosas con el coste reproductivo supuesto. [2]

Esto es un cambio en una inferencia, no una observación directa de neutralidad selectiva. Las mediciones moleculares, la extrapolación a un genoma y el modelo poblacional son tres pasos distinguibles. El argumento histórico solo puede evaluarse si los tres permanecen visibles.

4. Las premisas originales eran discutibles

La extrapolación de las proteínas a un genoma tenía consecuencias importantes. La crítica de Kern y Hahn de 2018 señala que Kimura utilizó un número de sitios del orden del tamaño del genoma al extender las tasas derivadas de proteínas, en lugar del número mucho menor de sitios codificantes de proteínas. También examinan cómo otros modelos de selección y supuestos demográficos alteran el límite de coste propuesto. Su evaluación es explícitamente crítica con la justificación original. [3]

Esto evita una falsa resolución histórica: introducir el coste de Haldane no completa una demostración inatacable de la neutralidad. Recupera el razonamiento que hizo comprensible la propuesta, incluidos los puntos en los que podía cuestionarse. La exactitud de una extrapolación de tasas y la adecuación de un modelo de costes son preguntas empíricas y teóricas por derecho propio.

No se trata de que la crítica borre el programa de investigación posterior. Una explicación propuesta puede generar cálculos útiles y comparaciones nuevas aunque se revise la estimación que la motivó originalmente. A la inversa, su utilidad posterior no puede validar retrospectivamente todas las premisas del artículo original.

5. Un debate cambia sus preguntas

«Non-Darwinian Evolution», de King y Jukes, de 1969, presentó argumentos moleculares a favor de un papel importante del

cambio neutral. El tratamiento de Ohta de 1973 de las sustituciones ligeramente perjudiciales convirtió después la frontera entre efectos selectivos despreciables y relevantes en parte del problema. Fueron desarrollos dentro de una discusión continua, no una conversión unánime tras un cálculo de tasas. [4,5]

La revisión histórica de Galtier describe cómo cambió el debate entre neutralistas y seleccionistas con la evidencia de la genética de poblaciones y de la genómica. La continuidad pertinente es un problema de investigación, no un conjunto de estimaciones de 1968 fijado para siempre. Distintas generaciones de evidencia podían cuestionar partes distintas de la propuesta. [6]

QTC-010 trata la relación general entre variación, selección y deriva. El interés más acotado de este artículo es el cambio histórico producido al contar sustituciones moleculares y comparar ese recuento con un coste reproductivo propuesto. Esa comparación hizo que la explicación supuesta de una sustitución pasara a necesitar su propio argumento.

6. La ruptura conceptual solo se conserva con su historia intacta

El nuevo problema no consistía únicamente en ofrecer un relato funcional para una molécula. Consistía en reconciliar una tasa medida o inferida con un mecanismo capaz de producirla bajo condiciones especificadas. Las comparaciones moleculares y los cálculos poblacionales debían ahora restringirse mutuamente.

Por tanto, deben mantenerse separadas tres afirmaciones: la tasa histórica estimada, el coste predicho por un modelo particular de selección y la tasa de sustitución esperada bajo neutralidad. Su tensión explica por qué la propuesta tuvo consecuencias

importantes. Sus limitaciones explican por qué la controversia no terminó con ella.

Una historia que comienza con la fórmula neutral y termina con una defensa general de la deriva pierde esa transformación. La ruptura más precisa fue la aparición de un cuestionamiento cuantitativo de una explicación causal supuesta de la sustitución molecular, seguido del examen de los supuestos de ambos lados del cuestionamiento.

Referencias

- [1] Haldane, J. B. S. "The Cost of Natural Selection." *Journal of Genetics* 55, 511–524 (1957). <https://doi.org/10.1007/BF02984069>
- [2] Kimura, M. "Evolutionary Rate at the Molecular Level." *Nature* 217, 624–626 (1968). <https://doi.org/10.1038/217624a0>
- [3] Kern, A. D., y Hahn, M. W. "The Neutral Theory in Light of Natural Selection." *Molecular Biology and Evolution* 35, 1366–1371 (2018). <https://doi.org/10.1093/molbev/msy092>
- [4] King, J. L., y Jukes, T. H. "Non-Darwinian Evolution." *Science* 164, 788–798 (1969). <https://doi.org/10.1126/science.164.3881.788>
- [5] Ohta, T. "Slightly Deleterious Mutant Substitutions in Evolution." *Nature* 246, 96–98 (1973). <https://doi.org/10.1038/246096a0>
- [6] Galtier, N. "Half a Century of Controversy: The Neutralist/Selectionist Debate in Molecular Evolution." *Genome Biology and Evolution* 16, evae003 (2024). <https://doi.org/10.1093/gbe/evae003>

La inmunidad se convierte en selección entre variantes biológicas

Un organismo puede producir una respuesta específica a una sustancia con la que no se ha encontrado antes. Una explicación posible es la instrucción: la sustancia extraña indica al organismo cómo construir la respuesta correspondiente. Otra es la selección: ya existe un repertorio de posibilidades diferentes, y el encuentro activa y expande preferentemente una parte que corresponde a esa sustancia.

La selección clonal cambió la ubicación propuesta de ese repertorio. Las variantes cruciales pertenecían a células con especificidades distintas, no solo a un conjunto de moléculas de anticuerpos que circulaban libremente. Esto convirtió la especificidad, la multiplicación y la persistencia en partes de una explicación celular común, al tiempo que creaba nuevas preguntas sobre la generación y el control del repertorio.

1. Lo que debía explicar una propuesta instructiva

La especificidad de los anticuerpos era un problema real. Un anticuerpo puede distinguir estructuras moleculares, y la exposición puede cambiar la intensidad de una respuesta posterior. Una explicación instructiva o basada en un molde intentaba explicar la correspondencia permitiendo que el antígeno guiara la formación de la molécula que respondía. Era un intento de resolver un problema de mecanismo, no simplemente una incapacidad para entender la selección.

La propuesta de Jerne de 1955 atribuía, en cambio, al antígeno un papel selectivo entre posibilidades de anticuerpos preexistentes. Su exposición publicada rechazaba explícitamente que el antígeno actuara como molde o como modificador enzimático. Fue un paso importante, pero todavía no era idéntico a la formulación celular posterior de la selección clonal. [1]

La distinción importa porque seleccionar una molécula y seleccionar una célula que se reproduce resuelven problemas distintos. Una molécula que se une a un antígeno no explica, por el mero hecho de unirse, cómo aparece una población sostenida de productores con especificidad relacionada. La ubicación de la variación determina qué tipo de mecanismo de amplificación se necesita.

2. Un linaje celular proporciona la conexión

La formulación de Burnet de 1957, desarrollada en un campo también configurado por Talmage y Jerne, situaba la selección al nivel de las células. Una célula con la especificidad adecuada podía ser estimulada para generar un clon de descendientes. La exposición utilizada aquí es la propuesta original de Burnet, leída en su reimpresión de 1976. Es un enunciado teórico de un participante, no una historia posterior de su recepción. [2]

La ganancia explicativa central es fácil de enunciar. Si los descendientes heredan una especificidad pertinente, seleccionar una célula puede aumentar el número de productores sin exigir que el antígeno instruya independientemente a cada productor nuevo. La multiplicación conserva una relación ya presente en el linaje seleccionado.

Es un modelo de organización, no la afirmación de que cada receptor inmunitario reconozca exactamente un patógeno completo. El reconocimiento atañe a rasgos moleculares y puede

presentar reactividad cruzada. Una explicación simplificada que asignara una célula a una especie infecciosa convertiría un principio organizador útil en un falso catálogo de correspondencias perfectas.

3. Observar una célula cambia la evidencia

Las mediciones del suero describen una mezcla de anticuerpos. Pueden mostrar que un organismo responde a dos antígenos sin revelar si cada célula que responde produce ambas especificidades o si células diferentes aportan productos distintos. Por tanto, las explicaciones competidoras pueden concordar al nivel de la mezcla.

El trabajo de Nossal y Lederberg de 1958 con células individuales abordó esta distinción. En animales estimulados con dos antígenos, las células individuales examinadas producían anticuerpos detectables de una especificidad o de la otra. La observación respaldaba una restricción celular que no podía inferirse simplemente de la diversidad del suero combinado. [3]

La palabra «detectables» importa. Un resultado negativo está acotado por la sensibilidad del ensayo y por las células y los antígenos examinados. El experimento no justifica una afirmación universal sobre todos los productos posibles de todas las células bajo cualquier condición. Su fuerza reside en que distinguió entre posibilidades organizativas en un contexto definido.

Imaginemos, solo como ilustración, una muestra con diez productores del tipo A y diez del tipo B. La mezcla contiene ambos productos, igual que podría hacerlo otra muestra con veinte productores dobles. Solo las mediciones que distinguen a los productores separan esas explicaciones. Un cambio de resolución observacional puede, por tanto, cambiar qué

mecanismo es contrastable sin cambiar el fenómeno global que se explica.

4. La memoria se convierte en persistencia y cambio de la estructura poblacional

Un modelo selectivo sugiere una manera de comprender una respuesta posterior intensificada. El primer encuentro cambia la población de células que responden y puede dejar descendientes persistentes. Un encuentro posterior no tiene por qué comenzar desde el mismo estado poblacional. El problema explicativo pasa de recordar un molde molecular a mantener y regular un repertorio celular modificado. [2]

Esta no es una explicación completa de la memoria inmunitaria. Distintos tipos celulares, estados de diferenciación y tejidos contribuyen de maneras diferentes. La selección es un principio organizador dentro de un sistema mayor. No sustituye la necesidad de explicar los requisitos de activación, la supervivencia, la señalización y la generación de poblaciones duraderas.

También hace más apremiante el problema de la tolerancia. Si existe un repertorio diverso antes de un encuentro, algunas posibilidades pueden reaccionar con componentes del propio organismo. Una teoría de expansión selectiva necesita, por tanto, mecanismos que impidan o regulen las respuestas dañinas. Llamar simplemente «propia» a una diana no es un mecanismo que una célula pueda leer sin un proceso físico.

5. ¿De dónde proceden las variantes?

La selección no puede explicar el origen de su repertorio inicial limitándose a repetir que se seleccionó una variante útil. El problema de la generación de variantes siguió siendo una

pregunta científica distinta. ¿Cómo podía el material genético heredado sustentar tantas posibilidades de anticuerpos sin requerir un gen heredado completo y separado para cada anticuerpo final?

El trabajo de Tonegawa estableció el reordenamiento somático de segmentos génicos de inmunoglobulinas como un mecanismo que contribuye a esa diversidad. Su conferencia Nobel de 1987 describe cómo las comparaciones moleculares entre estados celulares revelaron cambios en la organización de los genes. Es un relato retrospectivo de los experimentos y su interpretación, no la formulación original de la selección clonal. [4]

La relación entre ambos logros es instructiva. Una teoría de selección celular podía ser productiva antes de que se conocieran todos los detalles moleculares de la generación del repertorio. Los resultados moleculares posteriores restringieron esa teoría y le proporcionaron mecanismos. No hicieron innecesaria la distinción anterior entre instrucción y selección.

6. Qué cambió y qué quedó fuera de la explicación

La ruptura fue la capacidad de explicar una respuesta específica como un cambio de abundancia y estado de variantes biológicas. Eso convirtió la población celular que responde en parte de la evidencia, en lugar de tratar la mezcla final de anticuerpos como suficiente. Nuevas mediciones podían poner a prueba dónde residía la especificidad y cómo persistía.

La selección clonal no agota la inmunidad. El reconocimiento innato, las respuestas tisulares y las interacciones entre poblaciones celulares siguen siendo esenciales, y no todo fenómeno inmunitario se describe bien con el mismo modelo simplificado de clon. El valor de la teoría reside en un logro explicativo definido: conecta la diversidad previa con la expansión

selectiva sin exigir que cada molécula extraña diseñe su propio anticuerpo correspondiente.

Referencias

- [1] Jerne, N. K. "The Natural-Selection Theory of Antibody Formation." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 41, 849–857 (1955). <https://doi.org/10.1073/pnas.41.11.849>
- [2] Burnet, F. M. "A modification of Jerne's theory of antibody production using the concept of clonal selection." *Australian Journal of Science* 20, 67–69 (1957). Reimpreso en *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 26, 119–121 (1976), especialmente pp. 120–121. <https://doi.org/10.3322/canjclin.26.2.119>
- [3] Nossal, G. J. V., y Lederberg, J. "Antibody Production by Single Cells." *Nature* 181, 1419–1420 (1958). <https://doi.org/10.1038/1811419a0>
- [4] Tonegawa, S. "Somatic Generation of Immune Diversity." Conferencia Nobel (1987). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1987/tonegawa/lecture/>

La demostración formal encuentra límites internos

Un método regido por reglas puede ser preciso sin poder resolver todas las preguntas expresables en él. La lógica del siglo XX convirtió esta limitación en un objeto matemático. En lugar de limitarse a no encontrar una demostración o un algoritmo, los investigadores podían demostrar que una clase especificada de métodos no podía realizar una tarea universal.

El cambio resultante no abolió la demostración. Distinguió varios logros que, vistos desde lejos, pueden parecer intercambiables: comprobar una derivación propuesta, encontrar una derivación, decidir todo enunciado y establecer la consistencia de un sistema. Una vez separadas estas tareas, podían demostrarse sus distintos límites.

1. Estudiar las demostraciones como objetos finitos

El programa de Hilbert buscaba formalizar el razonamiento matemático y justificar su consistencia mediante métodos finitarios restringidos. Sus aspiraciones eran más específicas que la imagen popular de una máquina que descubre automáticamente toda verdad. Las propias demostraciones formalizadas podían estudiarse como secuencias finitas, aunque las matemáticas que expresaban se refirieran a estructuras infinitas. [1]

Este cambio dio una doble función a la demostración. Era un argumento dentro de las matemáticas y un objeto para otra investigación matemática. Podía preguntarse si una secuencia obedecía las reglas, si alguna vez podía derivarse una contradicción y qué supuestos requería un argumento de consistencia propuesto.

El programa no consideraba suficiente la manipulación arbitraria de símbolos para una ciencia con significado. Buscaba justificar métodos matemáticos potentes. Por tanto, sus dificultades atañen al alcance de esquemas formales y justificativos particulares, no a la afirmación de que toda práctica matemática sea únicamente sintaxis.

2. La incompletitud es relativa a un sistema

El trabajo de Gödel de 1931 estableció limitaciones para sistemas formales capaces de representar suficiente aritmética. En la forma moderna que incorpora el fortalecimiento de Rosser, una teoría consistente, efectivamente axiomatizada y que extienda una aritmética elemental adecuada no puede decidir todo enunciado de su lenguaje: algún enunciado no es demostrable ni refutable dentro de ella. [2,3]

Cada condición importa. Una teoría débil o restringida no tiene por qué ser incompleta de esta manera. Una colección que contenga todos los enunciados aritméticos verdaderos no es una salida efectivamente axiomatizada al resultado. Y un sistema inconsistente no es un fundamento completo satisfactorio por el mero hecho de que la inferencia clásica le permita derivar cualquier cosa.

La expresión «dentro de» importa tanto como «no puede». Un enunciado indemostrable en una teoría puede ser demostrable en otra más fuerte. Añadirlo como axioma cambia la teoría. Si la nueva teoría sigue cumpliendo las condiciones pertinentes, la incompletitud vuelve a aplicarse. El teorema no identifica un enunciado que ninguna forma concebible de razonamiento pueda establecer jamás.

3. Un sistema habla de sus propias derivaciones

La vía técnica utiliza la aritmética para codificar expresiones y demostraciones. Así, las relaciones entre secuencias finitas de símbolos pueden representarse como relaciones entre números. Una construcción diagonal produce después un enunciado cuyo contenido aritmético corresponde a una afirmación sobre su propia demostrabilidad en el sistema elegido. [2]

Esto no es simplemente la frase cotidiana «esta frase es falsa» revestida de notación matemática. La demostrabilidad es una relación especificada que implica derivaciones codificadas y reglas. La construcción funciona porque esas relaciones pueden representarse con suficiente precisión dentro de la aritmética. Las condiciones de la demostración impiden que una paradoja verbal sustituya a un argumento.

El tratamiento original de Gödel utilizaba una hipótesis más fuerte que la mera consistencia para una de las partes del primer resultado. Las formulaciones posteriores pueden debilitar ese requisito. Un relato histórico responsable debe distinguir la demostración original del teorema simplificado que suele enseñarse hoy, en lugar de atribuir a 1931 todos los refinamientos posteriores. [3]

4. La consistencia no puede certificarse simplemente a sí misma

El segundo teorema de incompletitud impone otro límite a las teorías consistentes suficientemente fuertes: bajo la formalización habitual de la demostración y la consistencia, una teoría así no puede demostrar su propia consistencia. La salvedad sobre la formalización es esencial; escribir cualquier enunciado conveniente y llamarlo «consistencia» no reproduce el objeto del teorema. [3]

Esto no significa que un matemático no pueda dar una demostración de consistencia para una teoría. Un marco más fuerte puede establecer la consistencia de otro más débil, y los resultados de consistencia relativa siguen siendo valiosos. Lo que queda impedido es un tipo particular de autocertificación desde dentro de un sistema que cumple los supuestos del teorema.

El resultado tampoco vuelve poco fiables las demostraciones individuales. Si una derivación finita sigue correctamente reglas aceptadas a partir de axiomas aceptados, el teorema no introduce un error en ella. Restringe lo que el aparato formal completo puede establecer sobre sí mismo y sobre todos los enunciados de su lenguaje.

5. La computación adquiere un límite análogo

Church y Turing abordaron el cálculo efectivo mediante análisis formales diferentes en la década de 1930. El artículo de Turing de 1936 describió la computación en términos de una máquina que sigue instrucciones finitas y utilizó ese análisis para establecer un resultado de indecidibilidad. La contribución no era únicamente una propuesta de dispositivo físico. Hizo matemáticamente accesible una limitación general de los procedimientos mecánicos. [4,5]

Un argumento moderno sobre la parada ilustra la estructura. Supongamos que un procedimiento H siempre decide correctamente si cualquier programa se detiene con cualquier entrada. Construyamos un programa D que, al recibir una descripción de programa p , pregunta a H qué hace p cuando recibe p como entrada. Si H predice la parada, D se ejecuta indefinidamente; si H predice que no se detiene, D se detiene.

Demos ahora a D su propia descripción. Cualquiera de las respuestas de H hace que D se comporte de manera contraria a esa

respuesta. Por tanto, el supuesto procedimiento decisor universal y siempre correcto no puede existir. Esta es una formulación moderna explicativa, no el enunciado ni el objeto exacto de la demostración original de Turing. Se refiere a una clase irrestricta de programas; muchos programas particulares y clases restringidas siguen pudiendo analizarse con éxito.

El contraste con la comprobación de una demostración es instructivo. Una demostración válida, cuando se proporciona, puede tener una estructura finita comprobable mecánicamente aunque ningún algoritmo decida toda pregunta matemática posible. Verificar un objeto presentado y garantizar la decisión de una pregunta arbitraria son tareas distintas.

6. Lo que hicieron posible los límites

La tesis de Church–Turing conecta una idea informal de cálculo efectivo con modelos precisos de computación. Los resultados de equivalencia entre modelos formales son teoremas matemáticos; la identificación con la noción informal es una tesis respaldada por el análisis, no otro caso del mismo tipo de demostración formal. [5]

Estos resultados no establecen que las mentes humanas trasciendan necesariamente toda explicación computacional. Esa conclusión requiere supuestos adicionales sobre el razonamiento humano y su consistencia. Tampoco muestran que la verdad sea arbitraria o que nada pueda conocerse. Su fuerza depende de la precisión de las proposiciones que realmente establecen.

La ruptura conceptual consistió en que los límites se volvieron demostrables desde dentro de la investigación matemática. No completar un programa universal podía explicarse mediante un teorema, en lugar de atribuirse a una persistencia insuficiente. Eso reorientó el trabajo hacia sistemas más fuertes y más débiles,

procedimientos de decisión restringidos y supuestos explícitos, dejando intacto un enorme dominio de demostración rigurosa.

Referencias

- [1] Zach, R. "Hilbert's Program." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/hilbert-program/>
- [2] Gödel, K. "Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I." *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38, 173–198 (1931). <https://doi.org/10.1007/BF01700692>
- [3] Raatikainen, P. "Gödel's Incompleteness Theorems." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/goedel-incompleteness/>
- [4] Turing, A. M. "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem." *Proceedings of the London Mathematical Society*, serie 2, 42, 230–265 (1936–1937). <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>
- [5] Copeland, B. J. "The Church-Turing Thesis." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/church-turing/>

Hacer medible la sensación: psicofísica y cronometría mental

Que una sensación se experimente de forma privada no impide realizar experimentos públicos sobre las condiciones en las que las personas distinguen estímulos o producen respuestas. La psicofísica y la cronometría mental del siglo XIX aprovecharon esta posibilidad. No introdujeron una regla directamente en la experiencia. Conectaron diferencias físicas controladas, juicios observables y tiempos de respuesta mediante modelos cuyos supuestos podían examinarse.

La ruptura fue metodológica además de conceptual. Las preguntas sobre la sensación y las operaciones mentales adquirieron formas cuantitativas. Pero el resultado numérico no revelaba automáticamente la estructura de una mente: un umbral, una escala inferida y una diferencia de tiempos de respuesta representaban afirmaciones distintas.

1. Una diferencia tiene un contexto

Añadir un peso pequeño puede resultar perceptible cuando el peso inicial es pequeño y difícil de advertir cuando es grande. La relación experimental pertinente es la que existe entre un incremento físico y el nivel del que parte. La exposición de Fechner de la ley de Weber dio a las diferencias proporcionales de estímulo un papel central en un tratamiento cuantitativo. [1]

En un intervalo idealizado, escribamos el incremento apenas perceptible como $\Delta I = kI$, donde I es la intensidad del estímulo y k una constante de proporcionalidad. No es una ley universal de todos los sentidos a cualquier intensidad. El comportamiento del

umbral, la adaptación, la tarea y el modo de presentar las alternativas pueden afectar a su aplicabilidad.

Con un valor ilustrativo de k de 0,05, una intensidad inicial de 100 unidades arbitrarias da un incremento de 5, mientras que una intensidad inicial de 200 da un incremento de 10. El incremento físico se duplica aunque la diferencia proporcional siga siendo la misma. Estos valores inventados ilustran una relación; no son mediciones históricas ni límites recomendados de detección humana.

El juicio medido tampoco es automáticamente una unidad privada de experiencia. Indicar que dos estímulos difieren es una acción dentro de una tarea. Convertir un patrón de esas acciones en una escala de magnitud subjetiva requiere un argumento adicional.

2. De pasos discriminables a una escala de sensación

Fechner propuso tratar diferencias apenas perceptibles iguales como incrementos iguales de sensación. Combinado con una regla proporcional de incremento del estímulo, esto conduce a una relación logarítmica entre una magnitud de sensación construida y la intensidad física. Sus *Elements of Psychophysics* conectan explícitamente la relación empírica con el principio de medición propuesto. [1]

El razonamiento puede mostrarse sin ocultar el supuesto. Si cada aumento proporcional de I a $I(1 + k)$ cuenta como un paso subjetivo igual, n pasos llevan el estímulo de un nivel inicial I_0 a $I_0(1 + k)^n$. Al despejar se obtiene $n = \ln(I/I_0)/\ln(1 + k)$. Por tanto, razones iguales corresponden a números iguales de estos pasos contruidos.

El logaritmo se sigue de las premisas; no las verifica de manera independiente. Una persona podría distinguir cambios sucesivos

de forma fiable sin experimentar cada uno como un incremento igual de magnitud. Por tanto, el salto inferencial no está en el álgebra, sino en identificar una unidad de discriminación con una unidad de sensación.

Esta distinción hace que el proyecto sea científicamente interesante, en lugar de inútil. Revela un supuesto que puede criticarse, compararse con otros métodos de construcción de escalas o ponerse a prueba mediante tareas diferentes. Una explicación cuantitativa gana precisión cuando hace explícita la conexión entre observación e interpretación.

3. Medir el tiempo entre estímulo y respuesta

El trabajo de Donders sobre la duración de los procesos mentales abordaba otro observable. El intervalo entre un estímulo y una respuesta contiene varios sucesos, incluidos el procesamiento sensorial y la producción de la respuesta. Comparar tareas podía, bajo ciertos supuestos, aislar el tiempo asociado a una discriminación o elección adicional. Su artículo del siglo XIX está disponible en una traducción inglesa de 1969. [2]

Una tarea podría exigir la misma respuesta siempre que apareciera una señal. Otra podría exigir elegir entre respuestas según la señal. Sus tiempos medios de reacción pueden diferir. La diferencia es una observación; atribuirla a una operación mental intermedia particular es una interpretación basada en un modelo de la estructura de la tarea.

Este fue un cambio sustancial en lo que podía investigarse. Una operación mental no necesitaba ser directamente visible si su adición a una tarea por lo demás comparable tenía una consecuencia temporal medible. El método hizo que una hipótesis sobre un proceso interno pudiera responder ante mediciones públicas de tiempo.

4. La sustracción solo funciona si los términos significan lo que afirmamos

Supongamos, como ilustración, que una tarea sencilla tarda una media de 250 milisegundos y una tarea de elección, 340 milisegundos. La diferencia es de 90 milisegundos. Solo representa la duración de una operación añadida si los demás componentes pertinentes no cambian y la organización del procesamiento permite la sustracción.

Si añadir una elección también ralentiza la codificación del estímulo, cambia la preparación o altera la ejecución motora, los 90 milisegundos combinan varios efectos. Si las etapas se solapan en el tiempo, la diferencia no tiene por qué igualar la duración de ninguna etapa concreta. Una aritmética exacta no puede reparar un modelo incorrecto de lo que se está restando.

El análisis de Sternberg de 1969 examinó explícitamente las etapas de procesamiento y las extensiones del método de Donders. Su importancia aquí es el paso de tratar una puntuación de diferencia como si se interpretara por sí sola a examinar qué manipulaciones experimentales y supuestos sobre las etapas respaldan una inferencia. [3]

Las observaciones repetidas pueden reducir la incertidumbre sobre la diferencia media y dejar incierta la interpretación estructural. Son incertidumbres distintas. Un experimento puede establecer un efecto muy estable sin identificar de manera única la operación mental responsable.

5. Medición sin un veredicto metafísico

Ni un umbral psicofísico ni una diferencia de tiempo de reacción resuelven todas las preguntas sobre la relación entre mente y cuerpo. Los experimentos establecen relaciones entre condiciones

físicas, descripciones de los participantes y acciones. Una afirmación filosófica sobre qué es en última instancia la experiencia requiere argumentos que van más allá del éxito del procedimiento temporal o de construcción de escalas.

A la inversa, la incertidumbre sobre la ontología última no vuelve inútiles las relaciones experimentales. Se pueden comparar condiciones, examinar regularidades y distinguir modelos de proceso sin resolver antes todas las discrepancias metafísicas. La posibilidad de este logro intermedio formó parte del cambio conceptual.

También sería engañoso comprimir a Weber, Fechner y Donders en una «revolución cognitiva» unificada. Sus preguntas, métodos y compromisos teóricos eran distintos. La conexión es una familia de maneras de hacer investigables cuantitativamente aspectos de la vida mental, no una doctrina única adoptada en un momento concreto.

6. Una nueva forma de responsabilidad explicativa

La contribución duradera fue una división disciplinada del trabajo. Los instrumentos especificaban estímulos y tiempos. Los participantes aportaban juicios o respuestas. Los modelos conectaban esas observaciones con afirmaciones sobre sensación o procesamiento. Cada conexión podía funcionar, fallar o requerir modificaciones con independencia de las demás.

Lo que dejó de ser necesario fue exigir que un proceso fuera directamente visible antes de estudiarlo cuantitativamente. Lo que pasó a ser necesario fue una explicación defendible de cómo la medición visible restringía el proceso invisible. Ese requisito sigue siendo exigente precisamente porque un número puede ser exacto mientras la interpretación asociada es demasiado fuerte.

Referencias

- [1] Fechner, G. T. *Elements of Psychophysics* (1860), pasajes seleccionados de la traducción inglesa de 1912, reproducidos en *Classics in the History of Psychology*. <https://www.yorku.ca/pclassic/Fechner/>
- [2] Donders, F. C. "On the speed of mental processes." *Acta Psychologica* 30, 412–431 (1969), traducción del artículo de 1868–1869. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90065-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90065-1)
- [3] Sternberg, S. "The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method." *Acta Psychologica* 30, 276–315 (1969). [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)

Recordar se convierte en reconstruir

Un suceso recordado puede conservar información real sin ser una reproducción de la experiencia original. Esta posibilidad cambia lo que debe explicar un experimento sobre la memoria. Debe dar cuenta tanto de la persistencia como de la transformación: qué sigue disponible, qué se omite, qué se reorganiza y qué se añade cuando una persona responde.

El desarrollo de las explicaciones reconstructivas no estableció que todos los recuerdos fueran falsos. Tampoco volvió obsoletas las mediciones anteriores del aprendizaje y la retención. Amplió la pregunta: de cuánta influencia de una experiencia anterior sobrevive a cómo se organiza esa influencia en un recuerdo presente.

1. La retención puede medirse sin un recuerdo perfecto

Ebbinghaus investigó el aprendizaje y el reaprendizaje de series de sílabas bajo condiciones controladas. Comparar el esfuerzo requerido al principio con el necesario después proporcionaba una medida del ahorro. Una serie podía no reproducirse libremente en un momento posterior y, aun así, reaprenderse con mayor facilidad que al aprenderla por primera vez. [1]

Ese resultado ya complica una oposición sencilla entre un recuerdo plenamente presente y otro completamente borrado. No recordar no implica que la experiencia anterior no haya dejado ninguna consecuencia medible. La pregunta experimental depende de la operación utilizada para detectar la retención.

Como ilustración simplificada, supongamos que el aprendizaje inicial requiere 100 unidades de trabajo y el reaprendizaje hasta el

mismo criterio requiere 60. El ahorro es de 40 unidades, o el 40 por ciento del trabajo inicial. Estos no son los datos registrados por Ebbinghaus ni su procedimiento completo de corrección. El ejemplo muestra por qué el reaprendizaje y el recuerdo libre pueden proporcionar medidas distintas de una misma historia de aprendizaje.

El método también tiene límites. Un porcentaje de trabajo ahorrado no es literalmente un porcentaje de una imagen almacenada que sobrevive. Es una relación entre desempeños bajo un procedimiento definido. El propio Ebbinghaus examinó influencias perturbadoras y el ámbito limitado en el que su método abordaba el problema. [1]

2. El significado cambia el objeto experimental

Remembering, de Bartlett, publicado en 1932, investigó la reproducción de material con significado y desarrolló una explicación reconstructiva. Su atención a un «esfuerzo por encontrar significado» concernía a cómo se conectaba el material con conocimientos previos y actividad organizada. Esas relaciones podían configurar la respuesta recordada, en lugar de conservar una copia elemento por elemento. [2]

No debe exagerarse el contraste metodológico hasta afirmar que un investigador descubrió la memoria auténtica mientras el otro midió algo irrelevante. El material deliberadamente restringido ayuda a aislar algunas influencias. Los relatos con significado hacen visibles otras. Las tareas responden a preguntas distintas, y ninguna representa automáticamente todas las ocasiones de recordar.

Volver a contar una historia puede conservar su sentido general y alterar detalles que resultaban poco familiares o difíciles de integrar. Esas transformaciones invitan a una explicación en

términos de la organización del recuerdo. Pero identificar un esquema plausible después de observar una distorsión no constituye, por sí solo, un modelo con una predicción única. La explicación se fortalece cuando restringe qué cambios deberían producirse bajo condiciones especificadas.

3. La reconstrucción debe distinguirse de la mera pérdida

Imaginemos un relato original que menciona a una persona colocando un sobre cerrado sobre una mesa. Una descripción posterior podría omitir la mesa, cambiar el color del sobre o añadir que contenía una carta. Estos ejemplos inventados ilustran discrepancias diferentes. La omisión, la sustitución y una adición inferida no tienen por qué compartir un mecanismo.

Por tanto, el investigador debe especificar qué cuenta como retención exacta y qué como reconstrucción. Si toda desviación de la repetición literal se atribuye a un proceso, la explicación corre el riesgo de volverse infalsable. Una paráfrasis resumida pero fiel no es el mismo resultado que describir con confianza un suceso que nunca ocurrió.

La comparación también depende del registro original. Sin un suceso de referencia suficientemente fiable, una discrepancia entre dos descripciones no identifica cuál cambió ni por qué. Los experimentos ganan capacidad de discriminación al controlar qué se presentó, qué información vino después y cómo se solicitó el recuerdo.

4. La información posterior se convierte en una variable experimental

El estudio de Loftus y Palmer de 1974 varió la formulación de preguntas sobre colisiones de automóviles filmadas. Las palabras

utilizadas influyeron en las estimaciones de velocidad expresadas, y una pregunta posterior examinó las descripciones de cristales rotos. El estudio hizo experimentalmente manipulable la relación entre el lenguaje posterior al suceso y las descripciones posteriores. [3]

Este tipo de resultado debe interpretarse con cuidado. Un efecto sobre una respuesta puede implicar cambios en la memoria, expectativas sobre la respuesta, interpretación de la pregunta o alguna combinación. Demostrar que las descripciones dependen de las palabras utilizadas no equivale a demostrar que la experiencia original se haya sobrescrito por completo.

El cambio valioso es la construcción de contrastes. Distintos grupos pueden ver el mismo suceso y recibir información posterior diferente. Si sus descripciones difieren sistemáticamente, la explicación no puede basarse solo en diferencias del suceso presenciado. Otras manipulaciones pueden investigar después si el efecto persiste con distintas demoras y pruebas.

5. Un significado familiar puede sustentar un recuerdo poco familiar

Los experimentos de Roediger y McDermott de 1995 mostraron que las personas que estudiaban listas de palabras relacionadas podían después indicar una palabra fuertemente asociada que no se había presentado. Esto proporciona otra vía hacia un problema reconstructivo: la relación entre los elementos estudiados puede sustentar una respuesta errónea sin que una pregunta posterior proporcione explícitamente la palabra ausente. [4]

El resultado no significa que estudiar palabras produzca normalmente solo recuerdos falsos. Las respuestas exactas y los errores sistemáticos coexisten. Esa coexistencia es precisamente lo que debe explicar una teoría útil. Un proceso que extrae relaciones

puede ayudar a organizar el material y, al mismo tiempo, hacer que un elemento relacionado pero ausente resulte familiar.

Tampoco pueden trasladarse directamente a sucesos autobiográficos las tasas de una tarea con listas de palabras. Difieren los materiales, el significado emocional, la demora, la recuperación repetida y la disponibilidad de registros externos. Un paradigma de laboratorio identifica una posibilidad reproducible y una pregunta abordable sobre mecanismos; generalizar requiere evidencia adicional.

6. Qué cambió la explicación reconstructiva

La memoria dejó de caracterizarse adecuadamente mediante una sola cantidad de contenido superviviente. Los investigadores también necesitaban explicar la forma que adoptaba una respuesta presente. El conocimiento previo, la tarea y la información encontrada después del suceso se convirtieron en posibles contribuyentes a esa respuesta.

Esto no elimina la retención estable ni implica que la confianza esté siempre fuera de lugar. Separa la confianza, la exactitud y el proceso que genera una descripción para que puedan medirse sus relaciones. También distingue una teoría del recuerdo de un veredicto sobre la veracidad del relato de una persona concreta.

La ruptura conceptual no fue, por tanto, sustituir la memoria por la invención. Fue reconocer que retener información y reconstruir una respuesta pueden ser partes del mismo sistema. Una explicación de ese sistema debe dar cuenta conjuntamente de sus aciertos y de sus errores característicos, sin convertir ninguno de ellos en la totalidad del fenómeno.

Referencias

- [1] Ebbinghaus, H. *Memory: A Contribution to Experimental Psychology* (1885), traducción de H. A. Ruger y C. E. Bussenius (1913), capítulo VII. <https://psychclassics.yorku.ca/Ebbinghaus/memory7.htm>
- [2] Bartlett, F. C. *Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge University Press (1932), especialmente capítulos X y XII. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511759185>
- [3] Loftus, E. F., y Palmer, J. C. "Reconstruction of automobile destruction: An example of the interaction between language and memory." *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 13, 585–589 (1974). [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(74\)80011-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(74)80011-3)
- [4] Roediger, H. L., III, y McDermott, K. B. "Creating false memories: Remembering words not presented in lists." *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 21, 803–814 (1995). <https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.4.803>

El cerebro adulto se convierte en un sistema cambiante

Un sistema nervioso adulto puede estar organizado anatómicamente sin estar congelado funcionalmente. Establecer esa afirmación exigía más que observar que los adultos aprenden. Los investigadores necesitaban conectar la experiencia o una intervención experimental con cambios medibles en las respuestas neuronales, y después determinar qué tipo de cambio respaldaba realmente la medición.

La historia no es una simple inversión desde una creencia universal en la inmutabilidad hasta una aceptación universal de la plasticidad. Las propuestas anteriores ya admitían que la experiencia alterara las conexiones neuronales. La transición importante fue de una posibilidad amplia a mecanismos diferenciados experimentalmente, con límites explícitos de lo que establecía cada resultado.

1. Una posibilidad antigua adquiere contrastaciones más exigentes

Los relatos históricos rastrean ideas sobre la modificación neuronal en el trabajo del siglo XIX y en las propuestas posteriores de Konorski y Hebb. Berlucchi y Buchtel destacan tanto esas raíces anteriores como los cambios de significado de «plasticidad». El término no siempre ha designado un proceso definido de manera uniforme. [1]

Esa historia descarta un relato cómodo pero inexacto según el cual nadie imaginó un cerebro adulto adaptable antes de un descubrimiento decisivo. El propio aprendizaje exigía desde hacía tiempo una explicación de la persistencia y el cambio. Lo que

seguía siendo difícil era identificar los cambios físicos pertinentes y mostrar cómo se relacionaban con la función.

Una predicción sobre conexiones alteradas no equivale a medirlas. Del mismo modo, una mejora conductual no identifica de manera única un fortalecimiento sináptico. Un mismo desempeño mejor podría implicar otra estrategia, atención modificada u otros cambios. Una explicación mecanística necesita evidencia que restrinja esas alternativas.

2. Una vía conserva los efectos de la estimulación previa

Los experimentos de Bliss y Lømo de 1973 examinaron respuestas en el área dentada del conejo después de estimular la vía perforante. Informaron de aumentos duraderos de la respuesta poblacional tras la estimulación de condicionamiento. Su análisis distinguió el aumento de eficiencia de la transmisión sináptica de los cambios de excitabilidad de la población que respondía. [2]

Esta distinción es científicamente importante. Una respuesta registrada mayor no identifica automáticamente una sola causa microscópica. La fuerza de la investigación reside en parte en separar posibles contribuyentes al efecto medido, en lugar de llamar a todo aumento «un recuerdo más fuerte».

El resultado estableció un cambio fisiológico persistente bajo condiciones definidas. Por sí solo no demostró que la preparación estimulada hubiera adquirido un recuerdo natural concreto. La potenciación a largo plazo se convirtió en un mecanismo candidato importante para el aprendizaje, pero relacionar un cambio inducido experimentalmente con el aprendizaje normal requiere conexiones adicionales.

Consideremos una medición ilustrativa en la que una respuesta evocada aumenta de una unidad normalizada a 1,4 y permanece

elevada. La observación es un aumento del 40 por ciento en esa respuesta medida. Llamarlo un aumento del 40 por ciento del conocimiento, o suponer que han aparecido un 40 por ciento más de sinapsis, añadiría interpretaciones sin respaldo. Las unidades de la medición restringen la afirmación.

3. El mapa adulto puede reorganizarse

El estudio de Merzenich y colaboradores de 1984 cartografió respuestas somatosensoriales en monos nocturnos adultos después de la amputación de dedos. Superficies cutáneas podían pasar a estar representadas en ubicaciones corticales asociadas anteriormente con los dedos ausentes. La representación medida se definía mediante respuestas neuronales a la estimulación, no mediante un atlas coloreado considerado permanentemente fijo. [3]

El experimento cambia lo que significa «mapa» en este contexto. Un mapa funcional es una relación entre ubicaciones y respuestas bajo condiciones especificadas. Si esa relación cambia, el mapa cambia incluso antes de establecer si la causa es crecimiento nuevo, eficacia sináptica modificada o desenmascaramiento de entradas antes débiles.

La distinción también evita una imagen engañosa de regiones cerebrales que se deslizan físicamente hacia espacios vacíos. Un límite desplazado en un mapa de respuestas no es necesariamente un desplazamiento masivo de tejido. La evidencia funcional y la anatómica abordan preguntas conectadas, pero distintas.

La respuesta de un mono adulto a una pérdida sensorial particular tampoco establece una recuperación ilimitada tras cualquier lesión cerebral humana. Importan la especie, la edad, la vía, el tipo de lesión y la escala temporal. Un resultado puede ser

decisivo contra una representación completamente fija y dejar sin resolver los límites de la reorganización útil.

4. La plasticidad es una familia de cambios

Los cambios de eficacia sináptica, los cambios en el equilibrio entre entradas, las conexiones estructurales alteradas y la generación de neuronas nuevas no son intercambiables. Agruparlos bajo una palabra resulta cómodo, pero puede ocultar la evidencia distinta que requiere cada uno.

Por ejemplo, una respuesta funcional puede cambiar sin demostrar el nacimiento de neuronas. A la inversa, identificar células recién generadas no establecería por sí solo cuánto contribuyen a una conducta concreta. Pasar entre estas afirmaciones requiere una cadena de mediciones, no apelar a la palabra general «plasticidad».

El parecido de familia es que la historia del sistema afecta a su organización o respuesta posterior. Ese parecido no significa que todo cambio sea beneficioso. Tampoco significa que todo cambio observado persista. Una explicación rigurosa especifica las condiciones inductoras, la propiedad medida, la duración y la consecuencia funcional.

5. Una controversia ilustra la necesidad de preguntas separadas

El desacuerdo de 2018 sobre la neurogénesis hipocampal en humanos adultos proporciona un ejemplo histórico de por qué importan estas distinciones. Sorrells y colaboradores informaron de un descenso hasta niveles indetectables en adultos en su material, mientras que Boldrini y colaboradores informaron de evidencia de persistencia a lo largo del envejecimiento. Son resultados publicados contrapuestos, no fundamentos para

considerar establecido o refutado todo cambio neuronal adulto. [4,5]

Su interpretación depende del muestreo de tejidos, de su conservación y de los marcadores utilizados para identificar estados celulares. Un marcador de neurona inmadura es evidencia que debe interpretarse en un contexto biológico y metodológico, no una fecha impresa directamente en la célula. La ausencia de detección también depende de la sensibilidad y la adecuación de los métodos.

Esta comparación no pretende resolver toda la literatura posterior sobre neurogénesis. Su función es mostrar que una pregunta sobre la generación de neuronas no debe sustituir a la pregunta más amplia, respaldada independientemente, sobre cambios en circuitos neuronales existentes. La evidencia de un mecanismo no puede resolver automáticamente la de otro.

6. Un nuevo problema explicativo, no una promesa de cambio ilimitado

Una vez que pudo mostrarse que la organización neuronal adulta cambiaba, la propia estabilidad se convirtió en parte del problema. Un sistema debe conservar suficiente organización para funcionar y permitir, al mismo tiempo, que persistan algunas consecuencias de la experiencia. Describirlo como rígido o como infinitamente maleable pierde esa tensión.

La ruptura conceptual sustituyó una imagen estática por un conjunto de preguntas distinguibles experimentalmente: ¿qué propiedades cambian, después de qué intervención, durante cuánto tiempo y con qué significado conductual? También estableció exigencias más precisas para la explicación. No basta un relato atractivo sobre el aprendizaje; tampoco basta una señal

neuronal modificada sin una explicación justificada de lo que mide.

El cerebro adulto es, por tanto, un sistema cambiante en un sentido matizado e investigable. Su capacidad de modificación es real, pero su alcance y sus mecanismos deben establecerse caso por caso. El avance reside en hacer de esas precisiones parte de la ciencia, en lugar de obstáculos para un eslogan inspirador.

Referencias

- [1] Berlucchi, G., y Buchtel, H. A. "Neuronal plasticity: historical roots and evolution of meaning." *Experimental Brain Research* 192, 307–319 (2009). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19002678/>
- [2] Bliss, T. V. P., y Lømo, T. "Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path." *Journal of Physiology* 232, 331–356 (1973). <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1973.sp010273>
- [3] Merzenich, M. M., Nelson, R. J., Stryker, M. P., Cynader, M. S., Schoppmann, A., y Zook, J. M. "Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys." *Journal of Comparative Neurology* 224, 591–605 (1984). <https://doi.org/10.1002/cne.902240408>
- [4] Sorrells, S. F., et al. "Human hippocampal neurogenesis drops sharply in children to undetectable levels in adults." *Nature* 555, 377–381 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature25975>
- [5] Boldrini, M., et al. "Human Hippocampal Neurogenesis Persists throughout Aging." *Cell Stem Cell* 22, 589–599.e5 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.stem.2018.03.015>