

Israel Salas Llanas

ESTRATEGIAS TROPOLÓGICAS EN CIENCIA

Tesis Doctoral

Programa de Doctorado en Filosofía y Ciencias del Lenguaje

Departamento de Lingüística General, Lenguas Modernas, Lógica y Filosofía de la Ciencia, Teoría de la
Literatura y Literatura Comparada

Director: Prof. Dr. D. José Pazó Espinosa
Codirector: Prof. Dr. D. Enrique Alonso González

Tribunal:

Prof. Dr. D. Eduardo Bustos Guadaño
Prof. Dr. D. Francisco José Salguero-Lamillar
Profa. Dra. Dña. Eulalia Pérez Sedeño

Universidad Autónoma de Madrid
2019

A quienes ven la ciencia como la metáfora más hermosa.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	6
Introducción	8
CAPÍTULO I: CONSTRUCTIVISMO: BREVE ANÁLISIS DOXOGRÁFICO DE SU DESARROLLO HISTÓRICO..	11
1. Introducción	13
2. Constructivismo: Análisis y síntesis.....	14
2.1. El hombre y la realidad	14
2.2. Constructivismo y solipsismo	14
2.3. Cognición y conocimiento.....	15
2.4. Interacción social y comunicación	15
3. El constructivismo en la historia del pensamiento occidental	16
3.1. El constructivismo en la antigüedad.....	16
3.2. El constructivismo en el Renacimiento	17
3.3. El constructivismo en la Ilustración	20
3.4. El constructivismo en el siglo XX.....	21
3.4.1. La teoría evolutiva del conocimiento	22
3.4.2. Uexküll y el mundo circundante.....	23
3.4.3. Piaget y los inicios de la epistemología genética.....	25
3.4.4. La revolución cibernética y el constructivismo radical	27
4. Conclusiones	30
CAPÍTULO II: CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO	32
1. Introducción	55
2. El mundo del observador y el mundo observado.....	34
3. Del realismo al constructivismo científico	35
4. Modelos en ciencia y filosofía.....	39
4.1. Éxitos y fracasos de los modelos en ciencia	42
4.1.1. Los casos límites y el problema de inconmensurabilidad	42
4.1.2. El problema de incompatibilidad (inter)teórica: Schwarzschild y los agujeros negros.....	44
4.1.3. El triunfo predictivo del modelo de cuerpo negro	47
4.1.4. El paradigma subatómico	48
4.1.4.1. El éxito empírico de los modelos nucleares	49
5. Conclusiones	51
CAPÍTULO III: ANALOGÍA Y METÁFORA EN CIENCIA	53
1. Introducción	55
2. Analogías, metáforas y modelos en ciencia.....	57
3. Analogía	59
3.1. La analogía en la radiación de cuerpo negro.....	59
3.2. La analogía en el efecto fotoeléctrico	60
3.3. La analogía en relatividad	60
4. Metáfora	62
4.1. Valores epistémicos de la metáfora científica	63
4.1.1. El valor heurístico de la metáfora.....	63
4.1.2. El valor catacrético de la metáfora	64
4.1.3. El valor exegético de la metáfora	65
5. Grandes metáforas en la historia de la ciencia	66
5.1. Phýsis.....	66
5.1.1. La phýsis como origen	67
5.1.2. La phýsis como fin	69
5.1.2.3. La phýsis como cambio cíclico	71
5.2. Mecanicismo.....	72
5.2.1. Ontología corpuscular de la metáfora mecanicista	73
5.2.2. Dinámica y geometría corpuscular de la metáfora mecanicista.....	73
5.2.3. Principios metateóricos de la metáfora mecanicista	74
5.3. Evolucionismo	78
6. Metáfora y física	80

6.1. Teoría de cuerdas	81
6.2. Mecánica cuántica y el bosón de Higgs	81
7. Conclusiones	82
Conclusiones generales	83
Referencias bibliográficas	85
Índice onomástico.....	95
Anexo I.....	98
Anexo II.....	101
Anexo III	102
Anexo IV	103

Todo cuanto pienso y deseo no tiene otra finalidad que la de pensar y unificar esos fragmentos, esos enigmas y esos azares espantosos.

FRIEDRICH NIETZSCHE, *Así habló Zaratustra*

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES DE LA CUESTIÓN Y OBJETIVOS PROPUESTOS

Como filosofía de la ciencia, el constructivismo centra su atención en el examen de las estructuras y procesos cognitivos que intervienen en nuestro modo de percibir el mundo, en el papel que desempeñan las estrategias metodológicas utilizadas en la investigación y en la interpretación de los resultados obtenidos. Esta escuela filosófica se asienta en las siguientes premisas:

- El conocimiento no se adquiere objetivamente de forma pasiva, sino que se construye subjetivamente de forma activa como un modo particular de situarse frente a la experiencia.
- La función de la cognición es de naturaleza adaptativa y su imperativo biológico persigue el ajuste y la viabilidad del organismo con el medio.
- La cognición sirve a la organización del mundo experiencial del observador y no al descubrimiento de una realidad presuntamente objetiva.
- El cerebro humano es autorreferencial y organizacionalmente cerrado, por lo que este solo puede recurrir a sus propios recursos internos para asignar significado.
- La facultad de operar cognitivamente nos permite trabajar con hipótesis con las que advertir y repetir ciertas experiencias conforme a una serie de patrones imaginativos.

Para el constructivismo, la ciencia y la cognición pueden describirse como dos dominios entrelazados que se activan mutuamente y se modulan entre sí a través de un lazo interno de retroalimentación, lazo que opera mediante la dinámica interna representativa, en el caso de la cognición, y la dinámica de formalización teórica, en el caso de la ciencia. Cada uno de estos dominios —ciencia y cognición— busca generar al mismo tiempo un marco de interacción que garantice, en el caso de la ciencia, el éxito predictivo a partir de los modelos y teorías utilizadas en la investigación y, en el caso de la cognición, una adecuación funcionalmente exitosa con el entorno. Al igual que ocurre con las estructuras y procesos que conforman nuestra arquitectura cognitiva, los modelos en ciencia se encuentran limitados por su propia estructura interna, así como por su dominio de aplicabilidad. Esta puesta en relación entre ciencia y cognición hacen del constructivismo una filosofía de la ciencia idónea con la que acometer el estudio de la modelización a partir de una serie de correspondencias entre la actividad científica y la actividad cognitiva.

Cognición

Modelización

La arquitectura cognitiva del observador impone los límites últimos a la hora de representar la realidad. →

La estructura teórico-matemática del modelo delimita su dominio de aplicabilidad.

La representación obedece al resultado de la dinámica interna del propio sistema y no a una fiel cartografía de cómo es el mundo. →

Los modelos no funcionan como fieles representaciones de la física del mundo, sino como abstracciones teórico-matemáticas con las que intervenir predictivamente en esta mediante el cálculo.

La realidad observada responde a un acto de construcción activo por parte del observador. →

La realidad estudiada se ve reducida a las hipótesis de partida del modelo y al dominio de aplicabilidad de las mismas.

Al ser su naturaleza adaptativa, la cognición → asume como finalidad generar un comportamiento funcionalmente exitoso con el medio, salvaguardando una imagen viable de este que garantice la supervivencia del sistema.

La abstracción teórica nos permite cuantificar la física del mundo y reducirla a una síntesis matemática de su comportamiento.

Durante la fase de observación, nuestro sistema cognitivo aísla estados, transiciones y correlaciones que considera relevantes para sistematizar las regularidades y patrones de comportamiento detectados en la fenomenología observable. En primer lugar, nuestros órganos sensoriales traducen los estímulos ambientales a un lenguaje neural estándar con el que el cerebro opera: los potenciales de acción. Estos órganos no dan cuenta de ninguna realidad situada más allá del horizonte cognitivo del propio sistema, ya que la modalidad de cada estímulo viene determinada por las estructuras y procesos que integran la arquitectura cognitiva del sistema en cuestión. Durante este proceso de construcción, tienen lugar distintas fases de decodificación de la información. En la primera fase, el sistema, tanto a nivel sensorial como neuronal, construye de acuerdo a su arquitectura interna algún tipo de relación entre los patrones y regularidades observadas. En una segunda fase, a partir de sus mecanismos de retroalimentación, el sistema construye correlaciones en forma de patrones y regularidades espacio-temporales. Estos patrones y regularidades no están presentes en el mundo, sino que se construyen mediante un proceso activo de búsqueda limitado por los patrones y regularidades del propio sistema; dicho de otro modo, la dinámica interna representativa del sistema construye patrones y regularidades de acuerdo con sus propios patrones y regularidades. Por último, en la tercera fase se procede a una descripción universal abstracta de los patrones y regularidades observadas; es decir, a su formalización teórico-matemática.

Los modelos en ciencia obedecen al resultado de esta formalización teórico-matemática de la realidad. Al entender la ciencia como una extensión de nuestra apertura cognitiva al mundo, el constructivismo permite estudiar los modelos como si de genuinas prótesis observacionales se tratasen con las que intervenir predictivamente en la física del mundo a través del cálculo. Podría decirse que, desde una perspectiva cognitiva, los modelos hacen las veces de prolongaciones exosomáticas de nuestros sentidos al permitirnos formalizar teórica y matemáticamente la física del mundo y facilitar nuestra intervención en esta de forma predictivamente exitosa. De este modo, y en contraposición al representacionalismo tradicional, el constructivismo apela a la viabilidad predictiva de los modelos y teorías, o lo que es lo mismo, a su ajuste funcional, como único requisito para su aceptación por parte de la comunidad científica, ya que entiende la relación entre la abstracción teórico-matemática y la realidad misma en términos de equivalencias funcionales, y no como una fiel cartografía de cómo el mundo es realmente. Como consecuencia, el constructivismo busca modular el talento epistemológico de la ciencia, desestimando la noción heredada de conocimiento científico como conocimiento objetivo y sustituyéndola por la de una ordenación de campos cada vez más amplios de experiencia con el que articular un conjunto de estrategias funcionalmente exitosas que faciliten la manipulación y el control de la física del mundo a partir de la modelización.

Por último, el constructivismo se cuestiona también sobre los mecanismos y procesos cognitivos intervinientes durante la fase de modelización. Entre estos mecanismos, la analogía y la metáfora merecen especial atención. Como estrategias inherentes a nuestro modo de organizar la experiencia, el razonamiento analógico y el pensamiento metafórico asumen un papel crucial en la investigación científica y más concretamente durante la fase de modelización. En primer lugar, la necesidad de dar a conocer los descubrimientos y de compartir hipótesis responde a una obligación ética de la propia investigación. Para ello, la ciencia se muestra inseparable de un lenguaje compartido, un lenguaje capaz de formalizar los enigmas del mundo físico y volverlos comprensibles de forma intersubjetiva: el lenguaje matemático. Este lenguaje, materializado mediante un conjunto de entidades lingüísticas (fracciones, índices, integrales, límites, etc.) —un léxico— y unas reglas operacionales (propiedad conmutativa, distributiva, de elemento simétrico, de elemento neutro, etc.) —una sintaxis—, permite tender un vínculo entre el mundo y su formalización simbólica, un vínculo en el que la intuición y la creatividad se valen de la analogía y la metáfora como estrategias clave con las que vertebrar una imagen coherente y conceptualmente aprehensible del mundo que nos rodea.

Dicho esto, este trabajo tiene como objetivo:

- Dar continuidad histórica a la consolidación del constructivismo como escuela filosófica y analizar las premisas sobre las que esta corriente de pensamiento se asienta.

- Situar al observador como piedra angular en la fase de investigación científica dado su papel determinante en la captura de regularidades y patrones de comportamiento en la fenomenología observable, en la ulterior recogida de datos y en su formalización teórico-matemática.
- Delimitar semántica y conceptualmente la noción de modelo e integrarla dentro del marco metodológico y epistemológico que ofrece el constructivismo como filosofía de la ciencia.
- Defender la importancia de la analogía y la metáfora en ciencia, así como su papel protagonista a la hora de formular hipótesis y configurar modelos con los que acometer el estudio del mundo físico.

DESARROLLO DEL TRABAJO Y METODOLOGÍA

Este trabajo se divide en tres capítulos que no presentan en sí mismos una escisión temática, sino un modo de organizar los contenidos de forma clara y ordenada. El primer capítulo: CONSTRUCTIVISMO: BREVE ANÁLISIS DOXOGRÁFICO DE SU DESARROLLO HISTÓRICO, introduce el estado de la cuestión, recuperando a partir de una breve doxografía algunas de las ideas que contribuyeron decisivamente a la ulterior consolidación del constructivismo como filosofía, desde las planteadas por parte de algunos los más aclamados pensadores presocráticos hasta las originadas como consecuencia directa del nacimiento de disciplinas como la cibernética y la computación que llevaron al constructivismo a su versión más radical a comienzos del siglo XX.

En el segundo capítulo: CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO, valiéndome del constructivismo como una factible filosofía de la ciencia, examinaré el papel que asumen los modelos en ciencia, analizando algunos de los problemas más controvertibles en torno al fenómeno de la modelización, como los casos límite, la inconmensurabilidad y el problema de incompatibilidad interteórica. Para ello, en primer lugar, situándome en el dominio de la macrofísica, contrastaré los postulados del modelo mecanicista de Newton frente a los del modelo relativista de Einstein, y así mostrar cómo, si bien resulta posible derivar matemáticamente el uno del otro, la falta de correspondencia semántica entre los términos involucrados niega la posibilidad de establecer diálogo coherente entre ambos modelos, ya que cada uno adopta una imagen particular de cómo es el mundo. En segundo lugar, situándome en el dominio de la microfísica, contrastaré los postulados de dos modelos nucleares: el modelo nuclear de gota líquida y el modelo nuclear de capas, ambos competidores por una dar cuenta de una teoría unificada del núcleo atómico, y mostrar cómo pese al éxito de ambos modelos por separado al permitir salvar distintos fenómenos originados en este nivel de realidad, la incompatibilidad presente entre sus postulados fundamentales impide inferir de ninguno una imagen fiable de la realidad atómica.

Al adscribir su éxito a las categorías de viabilidad predictiva o ajuste funcional, los modelos encuentran su justificación epistemológica en el constructivismo, donde la idea de representar fielmente la realidad se ve sustituida por la de desarrollar un conjunto de correspondencias funcionalmente exitosas entre el mundo físico y un conjunto de ecuaciones con las que salvar su comportamiento. Esta apuesta por el constructivismo como filosofía de la ciencia no solo permite reinterpretar algunos problemas relativos a la modelización, sino también explicar la existencia de una pluralidad de modelos mutuamente incompatibles pero predictivamente exitosos por separado en sus respectivos dominios de aplicabilidad, un hecho recurrente en la historia de la ciencia.

Finalmente, en el tercer y último capítulo: ANALOGÍA Y METÁFORA EN CIENCIA, examinaré la analogía y la metáfora en tanto mecanismos cognitivos que funcionan a modo de principios de organización de la experiencia, así como la importancia que ambas estrategias desempeñan tanto en la fase de investigación científica como en nuestro modo de interpretar y representar el mundo.

CAPÍTULO I

CONSTRUCTIVISMO: BREVE ANÁLISIS DOXOGRÁFICO DE SU DESARROLLO HISTÓRICO

Una mañana de primavera, un discípulo observaba unas ramas movidas por el viento. Acto seguido, preguntó a su maestro: «Maestro, ¿se mueven las ramas o es el viento?». Sin tan siquiera mirar hacia donde su discípulo señalaba, el maestro sonrió y dijo: «No se mueven ni las ramas ni el viento, sino tu corazón y tu mente».

ANTIGUO CUENTO ZEN

1. INTRODUCCIÓN

Tras su llegada a la isla de Phraxos, Nicholas conoce a Conchis, un excéntrico millonario con un largo y oscuro pasado. En uno de sus encuentros, este enigmático personaje narra a Nicholas dos historias dramáticas: la primera sobre un rico coleccionista de arte cuyo castillo se incendió junto con todas sus pertenencias; la segunda sobre un campesino ermitaño que esperaba desde hacía años la venida de Dios. Una noche, a la misma hora del mismo día en que el castillo de aquel coleccionista fue pasto de las llamas, el campesino presenció su tan esperanzada visión. Sorprendido ante tal coincidencia, Nicholas preguntó: «¿No estará sugiriendo que...?» (Fowles 2015, pág. 309). Conchis le interrumpió diciendo: «No estoy sugiriendo nada. No hubo relación alguna entre ambos acontecimientos. No es posible que exista ninguna relación. O, mejor dicho, soy yo. Yo soy el significado de la coincidencia, si es que tiene alguno» (*Op. cit.*, pág. 309).

En *El Mago*, John Fowles introduce un cambio en la comprensión de la relación que media entre nuestro conocimiento del mundo y cómo el mundo es realmente. Para Nicholas, la némesis de la construcción práctica de la realidad corre pareja al convencimiento de que el mundo es tal y como él lo percibe y no de otra manera. Gracias a su poder de acción, Conchis construye infinitos mundos diferentes en forma y estilo hasta que, finalmente, Nicholas descubre que la isla de Phraxos no obedece más que a una realidad construida expresamente para él. El constructivismo de Fowles alcanza su máxima expresión en este punto de la historia al sugerir que no es posible capturar fielmente la realidad, sino solo construir un modelo de esa realidad tal y como nosotros la experimentamos. Según el modo en que construyamos dicho modelo nos convertiremos nosotros mismos en el significado de esa relación, siendo como aquel campesino que finalmente se encuentra cara a cara con Dios.

Otro famoso pasaje que recupera esta visión constructivista del mundo se encuentra en el “Teatro Mágico” de Hermann Hesse. En su obra, Harry se ve a sí mismo como un lobo estepario, una bestia descarriada en un mundo que le es extraño e incomprensible. Una tarde, de regreso a casa, este lobo estepario se topa con un cartel luminoso con letras pálidas y parpadeantes que reza:

Teatro Mágico.
Entrada no para cualquiera.
¡Sólo...para...lo...cos!

En su desesperada búsqueda por encontrar el teatro, tienen lugar un sinnúmero de encuentros y vivencias singulares que ponen cada vez más en duda su imagen precedente del mundo. Finalmente, tras un baile de máscaras, Harry es conducido por su psicopompo, Pablo, hasta este Teatro Mágico, quien le avisa diciendo: «Este es mi teatro [...] Es de esperar que encontréis toda clase de cosas [...] Mi teatrillo tiene tantas puertas de palcos como queráis: diez, o ciento, o mil, y detrás de cada puerta os espera lo que vosotros vayáis buscando precisamente» (Hesse 1990, pág. 198). Detrás de una de las muchas puertas, en las que cada una alberga una realidad deliberadamente elegida, se encuentra un maestro de ajedrez que confiesa a Harry:

La ciencia tiene [...] razón en cuanto es natural que ninguna multiplicidad puede dominarse sin dirección, sin un cierto orden y agrupamiento. Pero en cambio es errónea, en la medida en que crea que solo es posible un orden único, obligatorio para toda la vida [...] Este error de la ciencia tiene muchas consecuencias desagradables [...] Nosotros completamos por eso la psicología defectuosa de la ciencia con el concepto de lo que llamamos arte reconstructivo [...] Como el dramaturgo moldea el drama de un puñado de personajes, así nosotros, de las piezas del ser desintegrado, construimos siempre nuevos grupos con un nuevo interjuego y suspenso, y nuevas situaciones que son eternamente inagotables. ¡Vea usted! (*Op. cit.*, págs. 213-214).

Acto seguido, con un suave gesto, el maestro de ajedrez deslizó la mano por encima del tablero, derribando todas y cada una de las figuras, luego las juntó y comenzó a construir, con las mismas piezas, un juego totalmente diferente, con nuevos grupos, relaciones y nexos completamente distintos. Este segundo juego guardaba cierta relación con el primero; era, en cierto sentido, el mismo mundo, hecho del mismo material, pero la tonalidad había cambiado, el compás era diferente, los motivos estaban subrayados de manera distinta, las situaciones colocadas de otro modo. Y así, poco a poco, el maestro fue reconstruyendo con las figuras numerosos juegos, todos parecidos entre sí, como pertenecientes al mismo mundo, comprometidos al mismo origen, cada uno, sin embargo, enteramente nuevo.

Al igual que Nicholas y Harry, el constructivismo se cuestiona sobre la presunta objetividad del conocimiento. ¿Cómo es posible hablar de una realidad objetiva cuando soy yo, desde mi propio sistema de creencias, el partícipe activo de todo cuanto observo? ¿Acaso tiene sentido pensar en una realidad carente de toda atribución subjetiva? Es más, si la realidad observada cambia según el observador, el lenguaje utilizado para describirla también debería cambiar, ¿no supondría esto un impedimento para la comunicación? Veamos qué tiene que decir el constructivismo de todo esto.

2. CONSTRUCTIVISMO: ANÁLISIS Y SÍNTESIS

El constructivismo basa sus postulados en dos principios fundamentales: en primer lugar, en la idea de que el conocimiento responde a una construcción activa del mundo, resultado de un modo particular de situarse frente a la experiencia; y, en segundo lugar, en la apuesta por el ajuste y la viabilidad como imperativo biológico de la cognición. Ante tales premisas, el constructivismo plantea interesantes cuestiones relativas al modo en que nuestro conocimiento se construye en torno a eso que denominamos realidad.

2.1. El hombre y la realidad

El constructivismo no es una ontología, sino una epistemología; es decir, como corriente filosófica, esta centra su atención en el estudio de los mecanismos y estrategias cognitivas que intervienen en nuestro modo de percibir la realidad. El punto de partida reside en el examen de los fundamentos fisiológicos que determinan nuestra relación con el entorno. Si bien es posible analizar el efecto que provocan los estímulos que inciden en nuestros órganos sensoriales como una cadena de eventos físico-químicos, las impresiones subsiguientes asumen, por su parte, valor subjetivo, razón por la que las interpretamos de acuerdo a nuestras propias experiencias.

La naturaleza problemática de la creencia de que somos capaces de capturar el mundo en su forma objetiva se muestra evidente en el campo de la fisiología. Foerster (1981) ofrece algunos ejemplos de cómo un estímulo solo se percibe si la captación sensorial se vuelve interpretable. Es cierto que los estímulos que nos rodean inciden directamente en nuestros receptores sensoriales y los activan; sin embargo, la captura sensorial no tiene lugar en los propios receptores, sino en regiones específicas del cerebro donde estas señales se traducen en potenciales de acción, ondas de descarga eléctrica que viajan a lo largo de la membrana celular facilitando la transmisión de los códigos neuronales (Schmidt 1987). Roth resume las consecuencias resultantes de este proceso afirmando que «la percepción es [...] una asignación de significado al significado de los procesos neuronales libres, a la construcción y la interpretación»³ (Roth 1986, pág. 149). Esta idea se fundamenta en estudios que muestran que el área de procesamiento en el cerebro se activa también a la hora de construir significado, lo que implica que los impulsos solo pueden adquirir la significación que les ha sido asignada por las estructuras y procesos cognitivos involucrados en el proceso de decodificación sensorial.

Al operar como un sistema funcionalmente cerrado y autorreferencial, la idea de que el cerebro pueda adquirir algún tipo de conocimiento sobre el mundo se basa, en primer lugar, en la organización innata de reglas de funcionamiento en el transcurso de su propia evolución y, en segundo, en los principios de organización desarrollados a partir de una serie de patrones de aprendizaje similares a los que tienen lugar en la infancia. El cerebro es el encargado de verificar en qué medida se corresponden los contenidos de información que se transmiten simultáneamente a través de las diferentes áreas sensoriales, un proceso al que Roth bautiza con el nombre de «verificación de coherencia paralela» (Roth 1987, pág. 242). El conocimiento resultante se adquiere por medio de una «verificación de coherencia consecutiva» (*Op. cit.*, pág. 243) generada gracias a que la memoria realiza esta comprobación comparando las excitaciones sensoriales que actúan conjuntamente con las excitaciones anteriores. A diferencia de los estímulos de control que actúan sobre la base de principios de organización innata o con la ayuda de una verificación de coherencia paralela, la verificación de coherencia consecutiva es flexible y, lo que es más importante, ofrece la posibilidad de corrección.

La tesis de que el cerebro solo puede recurrir a sus propios recursos cognitivos para asignar significado es una de las premisas sobre las que se asienta el constructivismo. Pese a estar sometido a la influencia de estímulos externos, si estos solos son accesibles al cerebro como potenciales de acción, resulta casi imposible determinar hasta qué punto las representaciones construidas por el sistema pueden considerarse fieles descripciones de cómo el mundo es realmente.

2.2. Constructivismo y solipsismo

La idea de que el cerebro construye su propia representación del mundo de acuerdo con sus limitaciones cognitivas no debe servir para identificar el constructivismo con el solipsismo. Como filosofía, el solipsismo (del latín [*ego*] *solus ipse*) es una corriente que plantea que lo único de lo que podemos estar seguros es de la existencia de nuestra propia mente consciente, y que la realidad que aparentemente nos rodea es incognoscible y puede no ser más que un fenómeno emergente de los estados mentales del propio yo, la única realidad tangible.

³ La traducción es mía.

El solipsismo recobró fuerza a mediados del siglo XVII como una variante extrema del subjetivismo cartesiano. En 1635, en *La vida es un sueño*, Calderón de la Barca ilustra esta creencia metafísica en el monólogo de Segismundo, quien encerrado desde su nacimiento en una torre se pregunta si es real el mundo que contempla a través de la ventana y si su vida no es en realidad más que un sueño. A diferencia del solipsismo, el constructivismo no niega la existencia de una posible realidad a la que atribuir validez objetiva, sino la imposibilidad de capturar dicha realidad más allá de los límites de la propia cognición humana. Es en este punto donde aparece la principal diferencia entre ambas posturas filosóficas, ya que si admitimos que el yo que constituye nuestro mundo experiencial no es la única realidad y que además existen otros sujetos autónomos que se perciben como reales igual que nosotros nos percibimos a nosotros mismos, resulta imposible afirmar que nuestra realidad percibida sea la única realidad. Como consecuencia, una presunta realidad objetiva solo podría darse atendiendo a la intersubjetividad de las experiencias individuales de cada uno de los agentes interactivos dentro de los límites de su propio mundo interpretado (Glaserfeld 1995).

2.3. Cognición y conocimiento

Así como los infantes en el curso de su desarrollo natural adquieren una visión cada vez más compleja del mundo a partir de la asimilación recíproca de nuevas ideas y experiencias acumuladas, el modo en que los adultos construyen su conocimiento tiene también su origen en la propia experiencia. La diferencia que presenta el conocimiento de los adultos frente al de los infantes estriba en que el primero se construye sobre un mayor bagaje experiencial que el segundo. Al ser así, el criterio de validez objetiva se fundamenta única y exclusivamente en la acomodación y asimilación exitosa de una serie de experiencias vivenciales. Esto explica por qué mientras no percibamos contradicciones en nuestro modo de ver el mundo, estaremos convencidos de que nuestro conocimiento de este es verdadero. Este presunto conocimiento verdadero pervive como un pálido reflejo de nuestra historia, de una época en la que nuestros antepasados creían estar en lo cierto al afirmar que la Tierra era un disco plano situado en el centro del universo o que el Sol giraba alrededor de la Tierra y no al revés. La inevitable sentencia a muerte impuesta a cualquier insensato que se atreviera a poner en tela de juicio la imagen imperante del mundo en aquella época, no solo ilustra nuestra firme intolerancia ante contradicciones que pueden volverse obvias con nuevas experiencias, sino también la tendencia más humana a ignorar dichas contradicciones y conservar las convicciones tradicionales, especialmente si las nuevas experiencias no requieren solo de algunas modificaciones menores, sino de una reconstrucción totalmente nueva de nuestra imagen del mundo.

2.4. Interacción social y comunicación

La razón por la que no nos damos cuenta de que somos nosotros quienes asignamos significado al mundo que nos rodea radica en el hecho de que no somos conscientes de las mediaciones cognitivas que intervienen en el proceso. En la vida cotidiana no resulta necesario tomar conciencia de estas construcciones, de modo que la convicción de que experimentamos el mundo tal y como este es reside en la ingenua creencia de que nuestra imagen del mismo corresponde aparentemente a la de las personas que nos rodean. Esta ilusión compartida de que nuestro mundo interpretado es el mismo que el que guardan nuestros congéneres obedece a dos aspectos dignos de mención: en primer lugar, a nuestra capacidad para percibir contradicciones o incoherencias y resolverlas y, en segundo lugar, a nuestro carácter social, este último ligado a la tesis aristotélica del hombre como *zoon politikón*⁴ (del griego ζoon πολιτικόν, “animal social”), según la cual el ser humano se ve empujado a subordinar su imagen de la realidad a una determinada realidad compartida o, más bien, a asimilar ambas.

Para Watzlawick (1994), estos problemas son inherentes a la comunicación humana, y sobre esta base analiza en qué medida la comunicación desempeña un papel crucial en la construcción de la realidad individual. En *¿Es real la realidad?*, Watzlawick sugiere que la relación entre dos observadores es más compleja que la mera suma de las características particulares de ambos por separado. De ser así, aseverar que cada observador construye su propia realidad supone afirmar que cada uno se debe al resto de observadores para construir una imagen comparativamente estable del mundo. Si asumimos este planteamiento, la reciprocidad de causa y efecto se convierte en un asunto de gran complejidad, ya que extraemos conclusiones de las experiencias pasadas para configurar nuevos esquemas mentales con los que interpretar experiencias futuras. Asimismo, al no ser conscientes de la subjetividad de estos esquemas,

⁴ La expresión aristotélica refiere concretamente al carácter social de los hombres dentro de una comunidad política. El sustantivo *zôion* significa «ser viviente» y el adjetivo que lo acompaña lo califica como «perteneciente a la *pólis*». Cf. Aristóteles (1988a, pág. 50).

tratamos de adaptar el comportamiento de los demás a nuestros propios esquemas de la realidad, a la vez que buscamos encontrar una explicación compatible entre el esquema de esa persona y el nuestro. Ahora bien, si partimos de la premisa de que dependemos de otras personas para estabilizar nuestra imagen del mundo, vale la pena tomar conciencia de la relatividad de nuestras creencias, ya que mientras estemos convencidos de que nuestras construcciones del mundo reflejan fielmente la realidad, no solo intentaremos atribuir nuestras propias construcciones a los demás, sino que, además, actuando de esta manera nos será imposible adquirir un nivel más alto de objetividad, ya que esto solo es posible con ayuda de una implementación intersubjetiva por parte de todos los miembros en el seno de una comunidad.

Algunos autores (Glaserfeld 1981, 1995; Foerster 1981) consideran que esta dependencia intersubjetiva en la viabilidad de nuestras propias construcciones tiene consecuencias que desembocan en el ámbito de la ética, un terreno que no es menos opaco para el constructivismo que para otras posiciones filosóficas. Según Glaserfeld,

el hecho de que el individuo necesite la corroboración de otros para establecer la viabilidad intersubjetiva de las formas de pensar y actuar implica una preocupación por otros como constructores autónomos. Si los forzamos de alguna manera a cumplir con nuestras ideas, *ipso facto* los invalidamos como corroboradores (Glaserfeld 1995, pág. 127).

De un modo similar, Foerster introduce lo que podría considerarse un imperativo ético para el comportamiento humano: «Actúa siempre de modo que se incremente el número de elecciones⁵» (Foerster 1981, pág. 55). Esta idea sugiere que nadie debe restringir las actividades de los demás, sino comportarse de un modo que permita aumentar la libertad de la propia comunidad. Un mayor nivel de libertad implicará a su vez un aumento en el número de elecciones y, por consiguiente, la posibilidad de aceptar la responsabilidad de las propias acciones también aumentará.

3. EL CONSTRUCTIVISMO EN LA HISTORIA DEL PENSAMIENTO OCCIDENTAL

La semilla filosófica del constructivismo se remonta a los albores de la Grecia clásica, donde algunos pensadores presocráticos, rechazando abiertamente cualquier pretensión de universalismo, realismo o validez objetiva, contemplaron la posibilidad de que la realidad percibida no fuera sino una forma más o menos coherente de entender el mundo. A continuación, recuperaré algunos de los planteamientos filosóficos más influyentes que contribuyeron de forma decisiva a la consolidación del constructivismo como sistema de pensamiento a lo largo de la historia, desde su origen en la Antigua Grecia hasta la aparición de su versión más radical a comienzos del siglo XX.

3.1. El constructivismo en la antigüedad

El constructivismo se consolidó formalmente como escuela filosófica en el siglo XX gracias a la súbita aparición de disciplinas como la cibernética, la neurociencia y la computación, y las aportaciones de un sinnúmero de investigadores de los ámbitos más diversos, como Lev Vygotsky (1896 – 1934), Jean Piaget (1896 – 1980), Heinz von Foerster (1911 – 2002), Ilya Prigogine (1917 – 2003), Ernst von Glasersfeld (1917 – 2010), Paul Watzlawick (1921 – 2007), Niklas Luhmann (1927 – 1998) o Humberto Maturana (1928 – presente), entre otros muchos. Sin embargo, las raíces de esta filosofía pueden rastrearse hasta la Antigua Grecia, siendo Alcmeón de Crotona (siglo VI a.C.), Heráclito de Éfeso (siglo VI a.C.), Jenófanes de Colofón (siglo VI a.C.) o Demócrito de Abdera (siglo V a.C.) algunos de los precursores más relevantes de esta corriente de pensamiento.

Ya en el siglo VI a.C., Jenófanes (ca. 570 – 475 a.C.), preocupado por la influencia que las creencias pudieran tener en la sociedad griega, realiza la siguiente reflexión:

Los etíopes dicen que sus dioses son chatos y negros, mientras que los tracios dicen que los suyos tienen los ojos azules y cabellos rojos. No obstante, si los bueyes o los caballos o los leones tuviesen manos y pudiesen dibujar y esculpir como las personas, entonces los caballos dibujarían a sus dioses como caballos y los bueyes como bueyes, y todos ellos formarían los cuerpos de los dioses a semejanza propia (Jenófanes, cit. Popper 1998, pág. 45).

Con esta irónica crítica al antropomorfismo, Jenófanes atribuye a las creencias la influencia directa de la percepción. La voluntad y el anhelo del ser humano por otorgar formas y actitudes humanas a los dioses

⁵ Este imperativo ético de Foerster responde a una reformulación del imperativo categórico kantiano: «Por consiguiente, disponer de sí mismo como un simple medio para cualquier fin supone desvirtuar la humanidad en su propia persona (*homo noumenon*), a la cual, sin embargo, fue encomendada la conservación del hombre (*homo phaenomenon*)» (Kant 2008, págs. 282-283).

para hacerlos más asequibles a su comprensión sugiere que cada pueblo o raza hará lo mismo de acuerdo con sus propias características particulares.

Así como en Jenófanes, el fenómeno de la percepción despertó gran interés entre algunos de los más aclamados filósofos griegos. Tal fue el caso de Demócrito, precursor de la escuela atomista, para quien «conocer lo que es cada cosa en realidad es imposible» (Demócrito, cit. Bernabé 2001, pág. 285); Protágoras (ca. 485–411 a.C.), quien con su principio *Ánthrōpos métron*⁶ («el hombre es la medida») insinúa que la realidad responde tan solo a aquello que se manifiesta en la propia conciencia⁷; o el mismo Anaxágoras (ca. 500–428 a.C.), para quien las apariencias son solo un atisbo de lo invisible.

Siglos más tarde, en sus *Esbozos Pirrónicos*, Sexto Empírico (ca. 160–210) recupera algunos de los planteamientos de estos pensadores presocráticos sobre el fenómeno de la percepción y la presunta validez del conocimiento:

La manzana, en efecto, puede que sea de una única forma y que se observe distinta según los diferentes sentidos en los que tiene lugar su percepción [...] El que la manzana pueda tener más cualidades de las que nos aparecen, lo razonamos así: imaginemos que alguien tiene de nacimiento los sentidos del tacto, el gusto y el olfato, pero que no oye ni ve. Ese tal supondrá que la substancia original de las cosas no es ni visible ni audible, sino que sólo existen aquellos tres tipos de cualidades que él puede percibir. Así, también es posible que teniendo nosotros sólo cinco sentidos, únicamente percibamos de las cualidades de la manzana las que somos capaces de captar; pero es posible que se den otras cualidades que caigan bajo otros tipos de sentidos de los que nosotros no estamos dotados, razón por la cual tampoco percibimos lo perceptible por ellos (Sexto Empírico 1993, pág. 83).

Lo interesante del fragmento de Sexto Empírico es el valor y función de la propia representación aprehensiva como criterio de verdad, una idea vinculada con la noción de *epojé* (del griego *ἐποχή*, «suspensión»), sello distintivo del escepticismo griego. En palabras de Sexto Empírico: «No podremos decir cómo es la realidad objetivamente, sino cómo aparece según esta forma de pensar, esta ley, esta costumbre y cada uno de los otros criterios. Y por ello, en conclusión, es necesario que mantengamos en suspenso el juicio acerca de la realidad exterior⁸» (*Op. cit.*, pág. 102).

3.2. El constructivismo en el Renacimiento

La llegada del Renacimiento trajo consigo una serie de cambios de orden científico, filosófico y teológico que marcaron un punto de inflexión en el modo de entender el mundo. En el terreno de la ciencia, el modelo heliocéntrico del sistema solar copernicano sustituyó al geocéntrico ptolemaico que había perdurado durante más de quince siglos, originando una verdadera revolución cosmológica que dio paso al nacimiento de la astronomía moderna⁹. Además de Copérnico, otras de las figuras clave en la revolución científica fueron el astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler (1571–1630), quien postuló las leyes sobre el movimiento de los planetas en su órbita alrededor del Sol; el astrónomo napolitano Giordano Bruno (1548–1600), quien, apoyado en una visión panteísta del universo, defendió la experiencia y la razón como única vía para alcanzar el conocimiento; y el astrónomo toscano Galileo (1564–1642), cuyo método experimental consolidó las bases del método científico actual.

En el terreno de la filosofía se impuso el humanismo a la vez que se abandonó la herencia escolástica medieval que buscaba justificar la existencia de Dios y se produjo un giro pragmático en la actividad filosófica que dirigía su atención al hombre. Entre los filósofos y humanistas más representativos de este periodo se encuentran Nicolás Maquiavelo (1469–1527), Thomas More (1478–1535), Michel de Montaigne (1533–1592), Pierre Charron (1541–1603), Antonio de Nebrija (1441–1522), Benito Arias Montano (1527–1598) o el propio Erasmo de Rotterdam (1466–1536), cuya obra *Nuevo Testamento* sirvió de base para la posterior versión inglesa de la Biblia del rey Jacobo.

Por último, en el plano teológico, la reforma llevada a cabo por Martín Lutero (1483–1546) originó una reforma intelectual que allanó el sendero a una sociedad abocada a una modernidad ligada a una

⁶ Según Sexto Empírico, la cita figuraba en la obra perdida de Protágoras *Los discursos demoleadores*, conservada a partir de la transcripción de algunos escritos antiguos, como los de Platón (siglo V a.C.), Aristóteles (siglo IV a.C.), Sexto Empírico (siglo I), Diógenes Laercio (siglo III) y Hermias (siglo V).

⁷ La idea de que la realidad, manifestada de un modo u otro, queda recluida a la propia experiencia convenció a algunos pensadores de la escuela sofista, como Gorgias (ca. 480–380 a.C.), para quien el conocimiento tenía lugar dentro del hombre, quedando este constreñido a la experiencia individual y construido gracias a los sentidos y contenidos de la memoria.

⁸ En esta misma obra, en el *Libro I, Capítulo XV*, Sexto Empírico introduce la noción de *tropo*, con la que apela a un argumento con el que se intenta negar la posibilidad de hacer juicios objetivos sobre la realidad.

⁹ Aunque el modelo heliocéntrico no fue aceptado hasta el siglo XVI, Aristarco de Samos (ca. 310–230 a.C.) ya propuso una concepción heliocéntrica del sistema solar, situando el Sol, y no la Tierra, en el centro del universo. Si bien las ideas de Aristarco no fueron aceptadas en su tiempo dado el argumento de autoridad que recaía sobre Aristóteles, algunos autores las recuperaron siglos después, como el astrónomo babilonio Seleuco de Seleucia (ca. 190 a.C.).

corriente de pensamiento individual. La razón pasó a constituir la única vía de acceso para estudiar el mundo, mientras que la fe quedó relegada al ámbito de lo trascendente, donde el acceso a Dios se encontraba mediado más por el sentimiento que por el conocimiento.

De entre todos los pensadores que dio a luz el Renacimiento, la figura de René Descartes (1596 – 1650) asume especial importancia. Considerado como el padre del racionalismo y epígono por excelencia de su época, Descartes sostiene que el fenómeno de la percepción es una función que corresponde al espíritu y «[la] fuerza por la cual conocemos propiamente las cosas, es puramente espiritual» (Descartes 2011a, pág. 37). En su *Segunda Meditación*, el filósofo francés limita el acto de percepción a un acto de conciencia sobre la propia sensación:

En fin, soy el mismo que siente, es decir, que recibe y conoce las cosas como por los órganos de los sentidos, puesto que en efecto veo la luz, oigo el ruido, percibo el calor. Pero se me dirá que esas apariencias son falsas y que estoy dormido. Sea; sin embargo, por lo menos es muy cierto que me parece que veo, que oigo y que me caliento; y esto es propiamente lo que en que mí se llama sentir, y esto, tomado así precisamente, no es otra cosa que pensar (Descartes 2011b, pág. 174).

Y, más adelante, en su respuesta a las *Sextas Objeciones*, desarrolla un análisis sobre la percepción sensible en diferentes niveles:

Para comprender bien cuál sea la certeza de los sentidos, hay que distinguir en ellos tres clases de grados. En el primero no se debe considerar otra cosa que aquello que los objetos exteriores causan inmediatamente en el órgano corporal; lo que no puede ser otra cosa que el movimiento de las partículas de ese órgano, y el cambio de figura y de situación que proviene de ese movimiento. El segundo contiene todo lo que resulta inmediatamente en el espíritu por estar unido al órgano corporal así movido y dispuesto por sus objetos; y tales son los sentimientos de dolor, de cosquilleo, de hambre, de sed, de los colores, de los sonidos, de los sabores, de los olores, de calor, de frío, y otros semejantes, que en la sexta meditación dijimos que provenían de la unión y, por decirlo, así de la mezcla del espíritu con el cuerpo. Y, en fin, el tercero comprende todos los juicios que acostumbramos hacer desde nuestra juventud, tocantes a las cosas que nos rodean, con ocasión de las impresiones o movimientos que se hacen en los órganos de nuestros sentidos (*Op. cit.*, págs. 369-370).

Con esta reflexión, Descartes se propone aunar los criterios fisiológicos y metafísicos que intervienen en el acto de percepción a partir de un argumento que respaldara su aforismo *Cogito ergo sum* (“Pienso, luego existo”), con el que buscaba demostrar la existencia de una certeza indudable, resistente a toda duda posible.

Y habiendo notado que en la proposición «yo pienso, luego soy» no hay nada que me asegure que digo verdad, sino que veo muy claramente que para pensar es preciso ser, juzgué que podía admitir esta regla general: que las cosas que concebimos muy clara y distintamente son todas verdaderas, y que sólo hay alguna dificultad en notar cuáles son las que concebimos distintamente (Descartes 2011c, pág. 124).

Esta idea del *cogito* responde a una renovada reformulación del dualismo platónico, según el cual existe un mundo inteligible, morada de las ideas, y un mundo tangible, percibido este por los sentidos y caracterizado por ser el mundo de las entidades física y por su carácter temporal, espacial y mutable. Esta demarcación platónica entre estos dos mundos fue recuperada por Descartes para establecer su distinción entre *res extensa* y *res cogitans*, la primera relativa a la idea platónica de corporeidad, vinculada con el mundo tangible, y la segunda ligada al pensamiento. Es más, la tesis del *cogito* cartesiano no solo es heredera de la tesis platónica de la dualidad, ya que también puede encontrarse en otros autores, como Agustín de Hipona (354–430 d.C.):

Es absurdo suponer que aquello que piensa no existe, al igual que en aquello que se piensa. Por tanto, este proceso cognitivo: yo pienso, por tanto, yo soy; es la primera y más certeza de todas las verdades, la cual ocurre, por tanto, en cualquiera que esté pensando [*Repugnat enim ut putemus id quod cogitat, eo ipso tempore quo cogitat, non existere. Ac proinde haec cognitio, ego cogito, ergo sum, est omnium prima et certissima, quae cuilibet ordine philosophanti occurrat*] (Agustín de Hipona, cit. Holmes 1843, pág. 394)

Incluso en el pensamiento del filósofo y teólogo inglés Guillermo de Ockam, quien, adelantándose a Descartes, plantea que si un alguien puede tener una intuición sensible sin la existencia de una entidad que cause dicha intuición, entonces no puede estar seguro de la realidad de aquello que intuye o percibe. Al igual que Descartes, otros pensadores coetáneos se valieron de las aportaciones de Guillermo de Ockham para el posterior desarrollo de su filosofía, como fue el caso de Gómez Pereira (1500–1558): «Conozco que yo conozco algo, y todo lo que conoce es, por tanto, yo soy [*Nosco me aliquid noscere: at quidquid noscit, est: ergo ego sum*]»; o Francisco Sánchez (1551–1623), quien defendió el examen directo de cualquier

realidad antes de asumirla como tal, sometiendo los datos de la experiencia al análisis y a la crítica del juicio¹⁰:

Daba vueltas a los dichos de los antiguos, tanteaba el sentir de los presentes: respondían lo mismo; mas, que me diera satisfacción, absolutamente nada. Ciertas sombras de verdad confieso que me ofrecían algunos, pero no encontré a ninguno que manifestase sincera y absolutamente lo que se ha de juzgar de las cosas. En consecuencia, retorné a mí mismo, y poniendo todo en duda como si nadie hubiera dicho nada jamás, comencé a examinar las cosas mismas, que es el verdadero modo de saber» (Sánchez 1984, pág. 53).

Pero pese al enorme impacto y trascendencia a la enorme influencia que las tesis cartesianas tuvieron en el racionalismo de la época, algunos pensadores coetáneos a Descartes, como Giambattista Vico (1668-1744), considerado por muchos como el padre del constructivismo, se opusieron firmemente a que la idea del *cogito* pudiera servir como fundamento del conocimiento. Según Vico, «la certidumbre de que se piensa [*cogito*] es consciencia, no ciencia» (Vico 2000, pág. 452), y esta última no puede fundamentarse sobre una evidencia definida como algo de lo que no se puede dudar, ya que los hechos no son algo por lo que todo se explica, sino, al contrario, algo que requiere ser explicado. De este modo, Vico introduce su principio *Verum ipsum factum* («La verdad es hacerlo»), con el que sugiere que la única verdad cognoscible radica en la propia experiencia y en la acción del hombre, quien, a diferencia de Dios, se vincula con la realidad del mundo a través de los símbolos presentes en su historia, su arte y mitología, siendo su propia vida el único dominio de conocimiento al que tiene acceso.

Lo verdadero es lo propio hecho; y, consecuentemente, en Dios está la verdad primera, porque Dios es el primer Hacedor; infinita, puesto que es el Hacedor de todo, exactísima, porque se representa tanto los elementos exteriores como interiores de las cosas [...] Saber es componer los elementos de las cosas: de donde el pensamiento es propio de la mente humana, y en cambio la inteligencia lo es de la divina, porque Dios comprende dentro de sí todos los elementos de las cosas, tanto exteriores como interiores, pues los contiene y dispone: más la mente humana, por ser finita y exterior a todas las demás cosas que no son ella misma, puede tan sólo tratar de agrupar los extremos de las cosas, pero nunca los abarca todos; de modo que puede pensar en las cosas, mas no entenderlas; y es, por ello, partícipe, mas no dueña de la razón (Vico 2000, pág. 446).

Las aportaciones de Vico irrumpieron como una fuerte crítica al racionalismo cartesiano al afirmar que solo es posible conocer aquello que de algún modo es construido a partir de la experiencia. Si bien es cierto, hay que reconocer que este planteamiento tampoco es, al igual que el *cogito* en Descartes, originario de Vico, pues ya Aristóteles lo desarrolla en *Acerca del alma*:

O bien el intelecto se dará en las demás cosas [...] o bien estará mezclado con algo que lo haga inteligible como las demás cosas [...] Lo inteligible ha de estar en él del mismo modo que en una tablilla en la que nada está actualmente escrito [*tabula rasa*], esto es lo que sucede con el intelecto¹¹ (Aristóteles 1988b, pág.101).

Con el tiempo, el filósofo y médico de origen persa del siglo XI, Avicena (ca. 980–1037), a quien sus discípulos llamaban *Cheikh el-Raïs* («El Príncipe de los Sabios»), reformula el pensamiento del Estagirita apelando a la educación y al trato empírico con los objetos como la base que permite dar forma al pensamiento:

El intelecto humano es como una *tabula rasa*, cuyo potencial se fomenta a través de la educación, llegando así a alcanzar el conocimiento. El conocimiento, por tanto, se logra a través de la familiaridad empírica con los objetos del mundo, de los cuales uno abstrae conceptos universales¹² (Avicena, cit. Ibrahim 2012, pág. 443).

Siglos más tarde, Santo Tomás de Aquino (1225–1274) recupera esta idea de *tabula rasa* y llega a la conclusión de que todo nuestro conocimiento comienza en los sentidos y que «el intelecto humano, que es el último de los intelectos y el más remoto de la perfección del intelecto divino, está en potencia con respecto a lo inteligible, y al principio es como una tabla rasa en la que nada hay escrito¹³» (Santo Tomás 2006, pág. 150). Las entidades cognoscibles se impregnan en los órganos sensoriales y actúan sobre ellos dando lugar a sensaciones. El objeto de conocimiento es la forma, captada en la propia entidad, percibida esta última por los sentidos y revelando una imagen sensible de sí misma sobre la que actuará el intelecto activo del observador abstrayendo la forma universal, es decir, aquello que es inteligible (*verbum mentis*). Por esta

¹⁰ La filosofía de Sánchez se fundamenta en una fenomenología de la probabilidad estrechamente vinculada con la tradición escéptica de Pirrón. En 1562 aparecieron en latín los *Esbozos pirrónicos* de Sexto Empírico, obra que influyó de forma determinante en el pensamiento de Sánchez.

¹¹ Las cursivas son mías.

¹² La traducción es mía.

¹³ La traducción es mía.

razón, aunque el proceso cognitivo parta de la experiencia sensible, de lo corpóreo, el verdadero conocimiento reside en la forma, que, según Santo Tomás, es inmaterial¹⁴.

Las reflexiones realizadas por Aristóteles, Avicena, Santo Tomás, Vico, así como las del propio Descartes, sobre la posibilidad de si la mente es o no una *tabula rasa* [*in qua nihil est scriptum*] avivaron la curiosidad de los más influyentes filósofos empiristas de los siglos XVII y XVIII. Tal fue el caso de John Locke (1632 – 1704), quien apela a la experiencia directa con los objetos como la única vía para alcanzar el conocimiento.

Supongamos, entonces, que la mente sea, como se dice, un papel en blanco, limpio de toda inscripción, sin ninguna idea. ¿Cómo llega a tenerlas? ¿De dónde se hace la mente de ese prodigioso cúmulo, que la activa e ilimitada imaginación del hombre ha pintado en ella, en una variedad casi infinita? ¿De dónde saca todo ese material de la razón y del conocimiento? A esto contesto con una sola palabra, de la *experiencia*: he allí el fundamento de todo nuestro saber, y de allí es de donde en última instancia se deriva (Locke 2005, pág. 83).

A diferencia de Descartes, para quien el hombre nace con algunos contenidos de conocimiento innatos, como la matemática o la idea de Dios, Locke se opone a todo tipo de innatismo, recurriendo a Dios como el artífice que permite al hombre tener contacto directo con sus ideas:

Entiendo las impresiones que hacen en la retina los rayos de luz y pueden concebirse los movimientos que de allí se continúan al cerebro y estoy persuadido que éstos producen ideas en nuestras mentes, pero de una manera que me es incomprensible. Esto lo puedo resolver sólo por la buena disposición de Dios, cuyas vías nos rebasan¹⁵ (*Op. cit.*, pág. XXXV).

Además de Locke, entre los más fervientes empiristas de su tiempo, el filósofo y obispo irlandés George Berkeley (1685–1753) merece especial atención. Convencido de la importancia de la percepción en el acto de conocer, Berkeley introduce su famoso aforismo *Esse est percipi* (“Ser es ser percibido”), expuesto por vez primera en su *Tratado sobre los principios del conocimiento humano*¹⁶: «Que todos los coros del Cielo y enseres de la Tierra, en una palabra, todos aquellos cuerpos que componen la magnificente estructura del mundo no tengan ninguna subsistencia sin una mente, pues *ser es ser percibido* o conocido¹⁷» (Berkeley 2002, pág. 13). Con esta máxima, Berkeley limita todo conocimiento al ámbito de lo mental y sugiere que el mundo tangible, tal y como este se revela al acto de percepción, tan solo responde a las ideas que Dios transforma en manifestaciones sensibles para nuestra comprensión¹⁸.

La filosofía empirista sirvió como una saludable crítica a la razón, delimitándola y restringiendo sus posibilidades a la propia experiencia. Al situar esta última como la única vía de acceso para conocer el mundo, las tesis empiristas contribuyeron sustancialmente al posterior surgimiento de la escuela constructivista, no tanto por su estricta significación filosófica como por su influencia y consecuencias históricas posteriores.

3.3. El constructivismo en la Ilustración

Con la llegada de la Ilustración, el constructivismo comenzó a ver la luz como filosofía gracias a los trabajos de Immanuel Kant (1724 – 1804), para quien los juicios que emanan de la propia experiencia (*a posteriori*) carecen de universalidad, siendo solo aquellas formas apriorísticas (*a priori*), a partir de las cuales podemos percibir toda la diversidad de fenómenos, las que adquieren validez universal.

Nuestro conocimiento surge básicamente de dos fuentes [...] la primera es la facultad de recibir representaciones (receptividad de las impresiones); la segunda es la facultad de conocer un objeto a través de

¹⁴ Este planteamiento llevó a Santo Tomás a cuestionarse qué ocurriría con aquellas entidades no materiales, es decir, aquellas que carecen de extensión corpórea. Finalmente, el Aquinate concluye que la única vía para alcanzar ese tipo de conocimiento ha de ser por analogía, ya que la percepción sensorial de estas entidades no materiales resulta imposible en este plano de existencia.

¹⁵ Esta reflexión sobre los límites de la comprensión humana comulga con la defendida por otros pensadores, como Pseudo-Dionisio Areopagita, teólogo y místico bizantino, para quien Dios «oculta a los sentidos las cosas inteligibles y a los seres lo que es superior a ellos y da forma y figura a las cosas sin forma y sin figura, y completa y da forma con variedad de símbolos divididos a la simplicidad sobrenatural» (Areopagita 2007, pág. 9).

¹⁶ Tanto *De Antiquissima Italarum Sapientia* de Vico como *Tratado sobre los principios del conocimiento humano* de Berkeley fueron publicados el mismo año, en 1710. Ambos trabajos presentan numerosos paralelismos en cuanto a su contenido; no obstante, no se tiene constancia de que ningún autor conociera, supuestamente, la obra del otro.

¹⁷ La traducción y cursivas son mías.

¹⁸ Las aportaciones de Berkeley no solo se vieron refrendadas por los más fervientes empiristas de su tiempo, sino también por los trabajos de algunos de los máximos exponentes del racionalismo del siglo XVII, como Nicholas Malebranche, para quien «cuando percibimos algo sensible, en nuestra percepción se encuentran sensaciones e ideas puras. La sensación es una modificación de nuestra alma y es Dios quien la causa en nosotros» (Malebranche 1980, pág. 234).

tales representaciones (espontaneidad de los conceptos). A través de la primera se nos da un objeto; a través de la segunda, lo pensamos en relación con la representación (Kant 1997, pág. 92).

Estas formas *a priori* —espacio, tiempo y causalidad— son innatas y actúan como filtros de la percepción, impidiendo el acceso directo al estudio de las entidades naturales, a la vez que como representaciones internas; es decir, como modelos de la realidad con los que configurar una imagen estable del mundo¹⁹.

Parece, efectivamente, como si la posibilidad de un triángulo pudiera ser conocida a partir del concepto en sí mismo (que es, desde luego, independiente de la experiencia). En efecto, podemos suministrar, enteramente *a priori*, un objeto a tal concepto, es decir, podemos construirlo. Pero dado que eso es sólo la forma de un objeto, seguiría siendo un producto de la imaginación y continuaría siendo dudosa la posibilidad del objeto de ese producto, en el sentido de que esa posibilidad requiere algo más, a saber, que semejante figura sea pensada bajo las puras condiciones en las que se basan todos los objetos de la experiencia. Lo que enlaza la representación de la posibilidad de un triángulo con su concepto empírico es el hecho de que el espacio constituya una condición formal *a priori* de la experiencia externa, el hecho de que la síntesis creadora mediante la cual construimos ese triángulo en la imaginación sea exactamente la misma que aquella que practicamos en la aprehensión de un fenómeno para formarnos de él un concepto empírico (*Op. cit.*, págs. 244-245).

En su *Crítica a la razón pura*, Kant sostiene que las estructuras y procesos que determinan la frontera cognitiva de un observador no solo existen *a priori*, es decir, de forma previa a todo tipo de experiencia, sino que son al mismo tiempo constitutivos de ella.

Se ha supuesto hasta ahora que todo nuestro conocer debe regirse por los objetos [...] Intentemos, pues, por una vez, si no adelantaremos más en las tareas de la metafísica suponiendo que los objetos deben conformarse a nuestro conocimiento, cosa que concuerda ya mejor con la deseada posibilidad de un conocimiento *a priori* de dichos objetos, un conocimiento que pretende establecer algo sobre éstos antes de que nos sean dados (*Op. cit.*, pág. 20).

A partir de este momento, lo apriorístico pasa a convertirse en lo que estructura el marco cognitivo del observador, siendo este el que pone en interacción el mundo interpretado (*phenomenon*), la única realidad accesible, y el mundo físico (*noumenon*), situado este último más allá de las fronteras cognitivas de nuestra comprensión.

La filosofía de Kant supuso una síntesis entre racionalismo y empirismo planteada como un análisis crítico con el que examinar el alcance del conocimiento. Las entidades que conforman nuestro mundo experiencial pasan a encontrarse necesariamente determinadas por nuestro modo innato de percibirlas. Las estructuras y procesos que integran nuestra arquitectura cognitiva operan sobre la base de unos principios de carácter universal que organizan todo el flujo de la experiencia en secuencias temporales y esquemas espaciales, así como en una serie de categorías necesarias para la unidad sintética del pensamiento²⁰.

Desde Kant surge una nueva concepción que atribuye al observador un papel determinante en la construcción del conocimiento. Es el observador el que construye la realidad a partir de un conjunto de categorías heredadas que incorpora en su percepción del mundo. Por vez primera, este deja de ser el descubridor de una realidad externa a sí mismo, así como el encargado de ampliar el límite del saber humano, y pasa a convertirse en el constructor de esa misma realidad, introduciendo en esta sus propias leyes.

3.4. El constructivismo en el siglo XX

La temprana madurez que mostraron los presocráticos en su modo de abordar fenómenos como el pensamiento, la percepción, el cambio y la presunta validez del conocimiento, originó toda una rama del pensamiento filosófico que hoy conocemos como epistemología. La posibilidad de que el mundo observado, tal y como se revela ante la experiencia, no responda a una imagen fiel de cómo este es realmente, dio paso a un sinfín de propuestas teóricas que con el tiempo allanaron el sendero a la consolidación de una escuela de pensamiento que, adelantada a su tiempo, exigía de una integración del

¹⁹ Las ideas de Kant originaron un cambio de paradigma en el que, retomando el argumento de Sexto Empírico, no solo se ponían en tela de juicio aquellas propiedades de la manzana susceptibles de ser percibidas sensorialmente (como la forma, el tamaño o el color), sino la condición misma de la manzana como entidad independiente y aislada del resto del mundo.

²⁰ Según Kant, estas categorías son, en primer lugar, de cantidad —unidad, pluralidad y totalidad—; en segundo lugar, de cualidad —realidad, negación y limitación—; en tercer lugar, de relación —de inherencia y subsistencia, es decir, sustancia y accidente; de causalidad y dependencia, o sea, causa y efecto; y de comunidad, interacción entre agente y paciente—; y en cuarto lugar, de modalidad —posibilidad-imposibilidad, existencia-inexistencia y necesidad-contingencia—.

conocimiento acumulado y unas innovadoras premisas teóricas que centraran su atención en la evolución que, como el hombre, tiene el conocimiento.

3.4.1. La teoría evolutiva del conocimiento

En 1866, el biólogo alemán Ernst Haeckel (1834–1919) dio a conocer su tesis de la recapitulación²¹, una propuesta con la que buscaba demostrar que «la ontogenia es una breve y rápida recapitulación de la filogenia²²» (Haeckel 2016, pág. 66). Esta tesis parte de la idea de que el desarrollo embrionario de cada organismo debe repetir en su totalidad el desarrollo del grupo orgánico al que este pertenece, ya que cada uno de los estados que el organismo atraviesa durante el proceso embrionario se relaciona con cada una de las formas adultas que tuvieron lugar a lo largo de su desarrollo evolutivo. Los trabajos de Haeckel originaron un cambio de paradigma orientado al estudio de los patrones adaptativos de los organismos con el medio ambiente en el que se prestaba especial atención a las funciones mentales de dichos organismos durante el propio proceso de adaptación. La incorporación de la perspectiva evolutiva al estudio de cognición recibió el nombre de teoría evolutiva del conocimiento, también denominada epistemología evolutiva, y fue desarrollada en su primera fase por etólogos dedicados a estudiar el comportamiento animal en su hábitat natural.

Aunque fue Donald T. Campbell (1916–1996) el primero en acuñar el nombre y darle un primer tratamiento integral, la teoría evolutiva del conocimiento vio la luz en los estudios realizados por el zoólogo vienés Konrad Lorenz (1903–1989), quien fue el primero en postular la existencia de un subconsciente cognitivo que posibilita el aprendizaje. A este subconsciente lo denominó sistema racionomorfo, expresión que tomó prestada del psicólogo húngaro Egon Brunswik (1952, 1955) y que describió como un conjunto de funciones preconscientes que, pese a no operar sobre criterios lógicos ni racionales (Lorenz 1971a, 1971b, 1981), condicionan nuestro modo de percibir el mundo²³.

En sus investigaciones, Lorenz asume la necesidad de atribuir a los organismos vivos algún tipo de conocimiento previo a la experiencia que permita la extracción de leyes y regularidades en su proceso de adaptación con el mundo, un planteamiento feudatario de los trabajos de Kant²⁴:

Dichos conocimientos universales, que, a la vez, poseen el carácter de necesidad interna tienen que ser pos sí mismos, independientemente de la experiencia, claros y ciertos. Por ello se los llama conocimientos *a priori*. [...] Incluso entre nuestras experiencias se mezclan conocimientos que han de tener su origen *a priori* y que tal vez sólo sirven para dar cohesión a nuestras representaciones de los sentidos. En efecto, si eliminamos de las experiencias lo que pertenece a los sentidos, quedan todavía ciertos conceptos originarios y algunos juicios derivados de éstos que tienen que haber surgido enteramente *a priori*, independientemente de la experiencia» (Kant 1997, págs. 41-42).

La diferencia entre ambos autores estriba en que, según Lorenz, los juicios *a priori* kantianos son *a posteriori* desde un punto de vista evolutivo, pues estos operan como mecanismos de supervivencia introducidos en la razón por evolución del aparato racionomorfo. El hecho de que nuestra especie sea capaz de construir contenidos de conocimiento a partir de su interacción con el medio sugiere que toda estructura viva encierra, en mayor o menor medida, un saber acumulado. Siendo así, y dado el desarrollo del sistema nervioso, de los órganos de los sentidos y del cerebro, los programas hereditarios de complejidad creciente extraen estos contenidos de forma cada vez más compleja, los almacenan y los reflejan adecuadamente.

Uno debe darse cuenta de que esta concepción *a priori* como un órgano significa la destrucción del propio concepto: algo que ha evolucionado conforme a las leyes del mundo exterior ha evolucionado *a posteriori* en cierto sentido, aunque de forma completamente diferente de la abstracción o deducción de la experiencia previa²⁵ (Lorenz 2009, págs. 231-232).

Las ideas de Lorenz fomentaron una nueva carrera investigadora de raigambre interdisciplinar destinada al examen evolutivo de las estructuras y procesos que configuran la arquitectura cognitiva de los seres vivos. El interés por saber hasta qué punto coinciden las categorías cognitivas con las reales llevó a Lorenz a concluir que «nuestras categorías y formas de percepción, fijadas *a priori* de la experiencia individual, se adaptan al mundo exterior del mismo modo que la pezuña del caballo está adaptada a la estepa

²¹ Pese a estar desacreditada en la actualidad, la teoría de la recapitulación de Haeckel fue ampliamente difundida en su época y estimuló en gran medida los posteriores estudios en el ámbito de la embriología.

²² La traducción es mía.

²³ Lorenz bautizó a estas funciones con el nombre de mecanismos de aprendizaje intuitivo [*Angeborene Lehrmeister*]. Cf. Lorenz (2009).

²⁴ Kant toma ventaja a Lorenz al sugerir que los seres humanos poseen premisas cognitivas heredadas que no pueden derivar de la experiencia y que, a su vez, preceden y facilitan toda adquisición de conocimiento.

²⁵ La traducción es mía.

antes de su nacimiento y la aleta del pez al agua²⁶) (*Op. cit.*, pág. 233). A partir de este momento, el conocimiento pasa a describirse como una facultad innata que ha evolucionado filogenéticamente proyectando una aproximación real al mundo. Esa proyección subjetiva que se percibe, y que es real, es, por definición, un modelo del mundo estructurado en categorías.

3.4.2. Uexküll y el mundo circundante

A comienzos del siglo XX, el zoólogo alemán Jakob J. Von Uexküll (1864–1944), considerado por muchos como el padre de la etología moderna, realizó importantes investigaciones en lo que denominó el mundo circundante [*Umwelt*²⁷] de los organismos. Este concepto, introducido por vez primera en su artículo *La biología y la psicología en su posición con respecto al alma animal* [*Pshychologie und Biologie in ihrer Stellung zur Tierseele*] de 1902, y desarrollado con posterioridad en *Mundo circundante y mundo interior de los animales* [*Umwelt und Innenwelt der Tiere*] en 1909 y en *Teoría biológica* [*Theoretische Biologie*] en 1920, sirvió de base para abordar el problema del espacio y la percepción en organismos vivos. Según Uexküll, cada organismo posee un conjunto de predisposiciones genéticas que le permiten percibir estímulos procedentes del entorno, causando estos una serie de respuestas eferentes según sea la estructura y la morfología evolutiva del organismo en cuestión²⁸. El organismo no interactúa con el mundo exterior, sino con una serie de señales y signos que le son afines y que lo impulsan a ejecutar determinadas acciones. Uexküll denominó a este conjunto de interacciones ciclo funcional [*Funktionkreis*] y que ilustra tomando como ejemplo la garrapata:

La garrapata se halla inmóvil en la punta de una rama hasta que un mamífero pasa bajo ella; entonces se despierta por el olor del ácido butírico, y se deja caer. Caer sobre la piel cubierta de pelos de su botín, a través de los cuales tiene que abrirse paso y llegar hasta la piel caliente, sobre la cual pone en acción su aguijón y aspira la sangre [...] La constitución de la garrapata, la cual es ciega y sorda, se halla organizada exclusivamente de tal modo que en su mundo circundante cualquier mamífero se presenta como el mismo portador de significación [...] Solo un único olor posee este portador de significación de la garrapata, que procede del sudor de los mamíferos y es común a todos ellos. Este portador de significación es además táctil y caliente y permite ser perforado para tomar su sangre. De este modo es posible reducir a un común denominador todos los mamíferos, tan diferentes en forma, color, emisión de sonidos y de olor que tenemos ante nosotros en nuestro mundo circundante, cuyas propiedades, al aproximarse a cualquier mamífero [...], surgen en un momento y desencadenan la regla vital de la garrapata (Uexküll 1942, págs. 107-108).

Uexküll se vale de la garrapata como ejemplo para mostrar que no existe una misma realidad percibida por igual por dos organismos diferentes, ya que cada organismo posee un ciclo funcional distinto. En el caso de la garrapata, su realidad se mide por el número de estímulos percibidos (el olor del ácido butírico que emana de las glándulas de la piel del mamífero, la detección de una zona glabra para parasitar, etc.) que son al mismo tiempo portadores de significado. Estos portadores de significado funcionan como vectores de acceso al mundo exterior y son la única relación que vincula al organismo con su entorno. La realidad revelada al resto de los organismos, sean estos más simples o complejos, se diferenciará de la realidad de la garrapata en función del número de vectores que estos posean.

Cada organismo está bien dotado como para obtener cierta percepción del mundo exterior. Cada especie vive su propio mundo sensorial, para el que otras especies puedan estar parcial o totalmente ciegas [...] Lo que un organismo detecta en su entorno siempre es parte de lo que está alrededor. Y esta parte es diferente según el organismo (Uexküll, cit. Sebeok 1996, pág. 137).

En el desarrollo de su teoría de los ciclos funcionales, Uexküll adopta la noción kantiana de esquema, según la cual, y así lo hace constar el mismo autor en su *Crítica*, «los principios del entendimiento puro [...] no contienen sino el esquema, por así decirlo, de la experiencia posible» (Kant 1997, pág. 260). Entre 1903 y 1907, Uexküll publica una serie de artículos bajo el título de *Estudios sobre el tono* [*Studien über den Tonus*] con los que reformula su visión de la biología recuperando algunos postulados kantianos

²⁶ La traducción es mía.

²⁷ Pese a que el concepto de *Umwelt* se atribuye comúnmente a Uexküll, este fue utilizado anteriormente por el poeta danés Jens I. Baggensen en su obra *Miradas del mundo circundante* [*Parthenais, oder die Alpenreise: ein idyllisches Epos in zwölf Gesängen*] de 1819.

²⁸ En *Teoría biológica*, Uexküll hace uso de la metáfora de la burbuja de jabón [*Seifenblase*] para describir el campo de pregnancias y saliencias de un organismo: «Entonces, el espacio peculiar de cada animal, donde sea que este se encuentre, puede compararse con una burbuja de jabón que rodea en su totalidad a la criatura [...] Esta pompa de jabón constituye para el animal el límite de su mundo, de su finitude, pues todo cuanto hay detrás de esta permanencia escondido en el infinito» (Uexküll 1926, pág. 42). La traducción es mía.

acerca del esquematismo presente en la configuración mental de las formas percibidas por los organismos en interacción con el medio.

Todos los cerebros difieren en cuanto a cómo perciben los objetos según sus formas; [cada organismo] tiene un medio para la detección de esas formas. Pero, la detección de tales formas puede considerarse un medio en sí. Una de las formas, como el conjunto de medios de detección de numerosas figuras, es lo que denominamos, según la terminología de Kant, un esquema²⁹ (Uexküll 1907, pág. 168).

[...]

El número de esquemas en el cerebro [de un organismo] es vital para el número de objetos que pueda percibir. [El organismo] debe encontrar los esquemas que permitan que las distintas entidades presentes en la naturaleza se tornen como arquetipos. Es la forma del contorno la que configura el esquema del arquetipo³⁰ (*Op. cit.*, pág. 202).

En 1934, en *Paseo por el mundo de los animales y los hombres* [*Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen*], Uexküll examina las diferencias entre cada uno de los mundos percibidos por diferentes tipos de organismos y afirma que no es posible conocer los esquemas representacionales de otros organismos si no es a través de nuestros propios esquemas.

Mostró Kant, con incomparable genialidad, que para hacer una experiencia es preciso que tengamos ya en nosotros mismos ciertas condiciones previas, merced a las cuales es la experiencia posible. Logró hallar ciertas leyes de nuestro espíritu, que anteceden a toda experiencia, y que son mucho más importantes y fundamentales que todas las leyes formuladas por los naturalistas (Uexküll 1934, pág. 128).

Los trabajos de Uexküll relativos al mundo circundante y al ciclo funcional de los organismos, así como a la relación entre el desarrollo ontogenético y filogenético de los mismos, despertaron el interés de muchos investigadores procedentes de los ámbitos más diversos. Tal fue el caso de Humberto Maturana, para quien los seres humanos, en tanto que son seres biológicos, no pueden tener acceso a una realidad descrita en términos objetivos, ya que la propia noción de objetividad como referencia independiente del observador responde a una presunción errónea.

Creemos que [...] conocemos sólo parte de la realidad en cualquier dominio, y que existen vastas áreas de ella que ignoramos, y que es esta ignorancia la que da lugar a las distintas corrientes de pensamiento, teorías y modelos. Sin embargo, también podemos considerar que este desacuerdo, esta diversidad de teorías, y, sobre todo, la diversidad de las prácticas efectivas, revela que la suposición de que a través del conocimiento tengamos acceso a una realidad independiente y objetiva es inadecuada y que el fenómeno de conocer es algo diferente (Maturana 2006, pág. 149).

En 1973, Maturana y Francisco Varela acuñan el término autopoiesis (del griego *poiesis*, vocablo que designa la acción creadora), según el cual

una máquina autopoietica es una máquina organizada como un sistema de procesos de producción de componentes concatenados de tal manera que producen componentes que: i) generan los procesos (relaciones) de producción que los producen a través de sus continuas interacciones y transformaciones, y ii) constituyen a la máquina como una unidad en el espacio físico (Maturana & Varela 1994, pág. 69).

[...]

El espacio determinado por dicho sistema [autopoietico] es completo en sí y no puede describirse usando dimensiones que definan otro aspecto. No obstante, cuando nos referimos a nuestras interacciones con un sistema autopoietico concreto, proyectamos ese sistema sobre el espacio en que efectuamos nuestras manipulaciones, y hacemos una descripción de esta proyección (*Op. cit.*, pág. 81).

La idea de autopoiesis sugiere que todo organismo vivo construye sus propios contenidos de información, los cuales, a su vez, delimitan la interacción del organismo con su entorno. Al ser el cerebro un órgano autorreferencial y organizacionalmente cerrado, el sistema nervioso genera sus propias condiciones de referencia, razón por la que la percepción sensorial no tiene lugar en los órganos de los sentidos, sino en regiones corticales del cerebro con las que están en contacto funcional (Maturana & Varela 1994). De este modo, el organismo se relaciona con su entorno a través de un acoplamiento estructural, el cual no solo es individual, sino que opera también a otros niveles (celular, poblacional, etc.), y sobre la base de ciclos completos de vida.

En el prólogo de la segunda edición de su obra *De máquinas y seres vivos*, Maturana sostiene que

²⁹ La traducción es mía.

³⁰ La traducción es mía

conocer, hacer y vivir no son cosas separables y que la realidad y nuestra identidad transitoria son *partners* de una danza constructiva [...] Entramos en una nueva época de fluidez y flexibilidad que trae detrás la necesidad de una reflexión acerca de la manera de cómo los hombres hacen los mundos donde viven, y no los encuentran ya hechos como una referencia permanente (Maturana & Varela 1994, pág. 58).

Y la misma línea, en *El círculo creativo*, Francisco Varela reconoce que

es fascinante que el mundo sea así de plástico, ni subjetivo ni objetivo, ni unitario ni separable, ni dual e inseparable. Esto apunta tanto a la *naturaleza* del proceso, que podemos percibir en la totalidad de su calidad formal y material, así como también a los *límites* fundamentales de aquello que podemos comprender de nosotros mismos y del mundo. Demuestra que la realidad no está constituida sencillamente a nuestro antojo, porque esto significaba suponer que podemos elegir un punto de salida desde adentro. Prueba además que la realidad no puede entenderse como algo objetivamente dado, como algo que recogemos porque esto significaría suponer un punto de partida externo. Demuestra de hecho una *ausencia de fundamento* sólido de nuestras experiencias, en las cuales nos son suministradas determinadas regularidades e interpretaciones, fruto de nuestra historia conjunta como seres biológicos y sociales. Dentro de estas áreas de historia común que reposan sobre acuerdos tácitos, vivimos en una aparentemente interminable metamorfosis de interpretaciones que se suceden (Varela 1994, pág. 60).

Al igual que Uexküll, Maturana y Varela consideran la relación entre un organismo y su entorno como un acoplamiento estructural en el que se configuran estrategias y dinámicas de adaptación que sirven de premisa para la supervivencia del organismo. Las perturbaciones ambientales pueden a su vez provocar cambios de estado en las estructuras y procesos cognitivos; no obstante, estas perturbaciones no determinan la forma de reaccionar de las estructuras internas, sino la estructura interna del organismo en tanto a cómo este reacciona ante tales perturbaciones. Los seres vivos son, pues, autónomos y autoorganizativos, y determinan sus propias leyes, por lo que no existe una relación de causa-efecto entre los estímulos del medio y las estructuras cognitivas individuales. En consecuencia, los contenidos de conocimiento se construyen siempre en relación con el esquema organizativo del organismo, siendo este último el responsable de la integración, ordenación, corrección, ampliación y diferenciación de cada uno de ellos.

3.4.3. Piaget y los inicios de la epistemología genética

A comienzos del siglo XX, el psicólogo suizo Jean Piaget (1896–1980), precursor de la epistemología genética, rescató algunos de los postulados de la tesis de la recapitulación de Haeckel hasta el punto de afirmar que el ser humano atraviesa en las primeras fases de su desarrollo cognitivo las mismas etapas que *Homo sapiens* ha atravesado a lo largo de su trayectoria evolutiva. Esta idea le llevó a dedicar toda su vida al estudio del desarrollo ontogenético de los infantes, esperando encontrar patrones de conducta en las primeras fases de desarrollo análogos a las fases evolutivas que han precedido al ser humano a lo largo de toda su historia.

Los estudios de Piaget buscaban desembarazarse del irresoluble problema innatismo-medio. Con excepción de contenidos y formas hereditarias muy primitivas, Piaget considera que el conocimiento humano no se encuentra prefijado en las estructuras cognitivas ni en el patrón estimular del objeto. La configuración mental de un objeto se debe a la aparición de nuevas estructuras cognitivas emergentes en la mente, entendida esta como un sistema dotado de auto-organización y auto-regulación. En este proceso de construcción de nuevos esquemas cognitivos, Piaget distingue entre un nivel operatorio que comprende las reglas de construcción y transformación del objeto y el componente figurativo, este último ligado a las características representacionales del objeto de conocimiento al que se aplican las reglas. Las reglas de construcción sobre los aspectos figurativos adquieren prioridad y se definen como un conjunto de operaciones asimilables a las lógico-matemáticas, abstractas y libres de la influencia del contenido. La inteligencia, por su parte, responde a una especie de actividad biológica con función adaptativa. En el caso de nuestra especie, esta posee una serie de estructuras biológicas que, tal y como rubricaría el mismo Uexküll, son innatas y determinan nuestra interacción con el medio; dicho de otro modo: lo que heredamos por evolución es un modo de «funcionamiento biológico» (Piaget 1978, pág. 17). Así como la diversidad de estructuras biológicas en un organismo se explica como el resultado de la adaptación de dicho organismo con su entorno, el desarrollo de la estructura cognitiva se encuentra ligado a una interacción bidireccional sujeto-objeto que permite al organismo reconstruir sus estructuras cognitivas a través de un proceso de adaptación con el entorno que, al mismo tiempo, le permite estimular nuevas reconstrucciones intelectuales (Piaget 1979).

Fiel a las tesis de Uexküll, Piaget se vale de la noción kantiana de esquema para apelar al «conjunto estructurado de los caracteres generalizables de la acción, es decir, de aquellos que permiten repetir la misma acción o aplicarla a nuevos contenidos» (Piaget 1978, pág. 16). Para Piaget, estos esquemas se

configuran según diferentes grados de abstracción. Si el desarrollo cognoscitivo responde al resultado de una serie de cambios en las estructuras que integran la arquitectura cognitiva, estas se verán configuradas de acuerdo a la asimilación y la acomodación de nuevos esquemas, operando la asimilación en la incorporación de elementos externos y la acomodación en la necesidad de ajuste del esquema ante una nueva situación.

La diferencia entre los sistemas biológicos y cognitivos es que los primeros no logran la elaboración de formas sin contenidos exógenos: dicho de otra forma, la conservación mutua de los elementos del ciclo A, B, C, etc., no es posible sin su alimentación continua por medio de los elementos exteriores A', B', C', etc. [...] Igualmente se supone que, en el nivel de los esquemas sensorio-motores, los diferentes movimientos e índices perceptivos constitutivos de un esquema se unirán en un ciclo de elementos en interacción ABC, etc., indisolubles del contenido material de las acciones y de sus objetivos, y por tanto, de los A', B', C', etcétera, mientras que un mismo esquema (por, ejemplo, un grupo de desplazamientos), cuando se traduce en operaciones [...], puede dar lugar a consideraciones puramente formales [...] tales ciclos epistémicos y su funcionamiento se basan en dos procesos fundamentales que constituirán los componentes de todo equilibrio cognitivo. El primero es la asimilación de un elemento exterior (objeto, acontecimiento, etc.) en un esquema sensorio-motor o conceptual del sujeto. Así pues [...] se puede hablar de asimilación recíproca cuando dos esquemas o dos subsistemas se aplican a los mismos objetos (por ejemplo, mirar y coger) o se coordinan sin tener necesidad de contenido real [...] El segundo proceso central [...] es el de la acomodación, es decir, la necesidad en que se encuentra la asimilación de tener en cuenta las particularidades propias de los elementos que hay que asimilar (Piaget 1998, págs. 7-8).

El desarrollo de las estructuras cognitivas, o lo que es lo mismo, de todo el conjunto organizado de esquemas con creciente nivel de complejidad, evoluciona a lo largo de una serie de etapas o fases (Piaget 1999). En la primera etapa, o fase sensorio-motriz, comprendida esta desde el nacimiento hasta los dos años, el infante se sitúa en un estadio prelingüístico y su inteligencia se apoya fundamentalmente en la acción. El entorno se compone de impresiones sensoriales, no de entidades en sí mismas, ya que sus acciones y movimientos carecen de un referente operacional simbólico, por lo que su experiencia del mundo se revela a través de los sentidos y la acción. Al finalizar esta primera etapa, el infante ha desarrollado determinadas categorías que le permiten organizar su mundo experiencial, como el espacio, el tiempo y la causalidad —coincidiendo estas con las formas de percepción *a priori* kantianas—, siendo la acción lo que permite incorporar dichas categorías a las estructuras cognitivas³¹.

Nada puede poner mejor de manifiesto los vínculos [...] de la percepción, del hábito y de la inteligencia, como el análisis de la construcción sensorio-motriz por los esquemas fundamentales del objeto y del espacio (por otra parte, indisolubles de la causalidad y del tiempo). Esta construcción es, en efecto, estrechamente correlativa del desenvolvimiento de la inteligencia preverbal (Piaget 1999, pág. 120).

En la segunda etapa, o fase del pensamiento intuitivo, comprendida entre los dos y los siete años de edad, el sujeto se inicia en la utilización de símbolos, así como en el desarrollo de habilidades para advertir los nombres de las cosas que no están presentes. Aunque este es capaz de desarrollar juegos imaginarios, el pensamiento es egoico; es decir, el sujeto es capaz de percibirse a sí mismo como una entidad separada del entorno. Además, en esta fase aparece el lenguaje, a través del cual el sujeto estructura su pensamiento con palabras e imágenes, aunque todavía se muestre incapaz de razonar de un modo lógico.

Este pensamiento intuitivo señala un progreso sobre el pensamiento preconceptual o simbólico: referida esencialmente a las configuraciones de conjunto y no ya a figuras simples semi-individuales, semigenéricas, la intuición lleva a un rudimento de lógica, pero bajo la forma de regulaciones representativas y no aún de operaciones (*Op. cit.*, pág. 145).

En la tercera etapa, comprendida esta entre los siete y los doce años, el sujeto comienza a realizar operaciones lógicas, volviéndose capaz de situar cosas y sucesos de forma secuencial siguiendo un orden determinado; no obstante, su pensamiento sigue circunscrito a las características concretas del mundo que lo rodea.

La última etapa tiene lugar a partir de la adolescencia y se considera la fase de las operaciones formales. El sujeto adquiere la capacidad de trascender la realidad, elaborando y verificando hipótesis de manera exhaustiva y sistemática. El pensamiento simbólico se incluye en los procesos de razonamiento y los pensamientos no se limitan exclusivamente al momento presente, ya que es posible razonar de forma abstracta.

La constitución de operaciones formales [implica] toda una reconstrucción, destinada a trasponer las agrupaciones «concretas» en un nuevo plano de pensamiento [...] El pensamiento formal alcanza su plenitud

³¹ Para Piaget, las categorías de espacio, tiempo y causalidad se adquieren durante la primera fase de desarrollo del infante. Esta afirmación se contrapone a la tesis de Kant, para quien dichas categorías son innatas.

durante la adolescencia. [El adolescente] reflexiona fuera del presente y elabora teorías sobre todas las cosas, complaciéndose particularmente en las consideraciones inactuales. El niño, en cambio, sólo reflexiona con respecto a la acción en curso, y no elabora teorías, aun cuando el observador, al notar el retorno periódico de reacciones análogas, pueda discernir una sistematización espontánea en sus ideas. Este pensamiento reflexivo [...] tiene un nacimiento hacia los 11-12 años, a partir del momento en que el sujeto es capaz de razonar de un modo hipotético-deductivo, es decir, sobre simples suposiciones sin relación necesaria con la realidad o con las creencias del sujeto, confiado en la necesidad del razonamiento (*vi formae*), por oposición a la concordancia de las conclusiones con la experiencia (*Op. cit.*, pág. 162-163).

Todas y cada una de estas etapas comprenden una fase del desarrollo cognitivo que es cualitativa y cuantitativamente distinta de la anterior. Una vez que el sujeto entra en una nueva fase de aprendizaje, este no retrocede a un estado previo, ya que las etapas son jerárquicamente inclusivas y las estructuras cognitivas de una fase se integran en la siguiente. Cada etapa puede entenderse como el resultado de una maduración cognitiva de determinadas estructuras que tiene lugar en las primeras fases de desarrollo. Las estructuras evolutivamente más recientes, denominadas áreas asociativas, serían, desde un punto de vista filogenético, las últimas en desarrollarse y requerirían de la interacción con el entorno para su completa maduración.

Si bien es cierto, desde que nuestros ancestros *Sapiens* aparecieron por vez primera en la sabana africana, aún no se ha producido ninguna mutación a nivel filogenético, por lo que podemos asumir que nuestros antepasados cazadores-recolectores disponían de un modo de funcionamiento intelectual en potencia similar al nuestro. Es por esta razón que Piaget habla de un funcionamiento biológico, un tipo de funcionamiento que remite a nuestra herencia evolutiva, la cual se ha ido forjando a partir de la acción con el entorno y la recepción de estímulos medioambientales.

3.4.4. La revolución cibernética y el constructivismo radical

La objetividad es pensar que una observación puede hacerse sin observador.

HEINZ VON FOERSTER

La llegada del siglo XX trajo consigo la aparición de una nueva teoría de la cognición de raigambre interdisciplinar que atendía a las bases neurofisiológicas del sistema de observación; es decir, a la construcción de invariantes que funcionan a modo de esquemas y que permiten ordenar todo el flujo de la experiencia. De entre todas las disciplinas que convergieron en la consolidación de esta teoría, la cibernética merece especial atención. En su discurso *Cybernetics of Cybernetics*, Heinz Von Foerster introduce por vez primera el término *Cibernética de segundo orden* (*Second-Order Cybernetics*), inaugurando así una nueva teoría del observador en la que no solo se estudiaba el sistema, sino también al observador como parte del propio sistema.

Se requiere un cerebro para escribir una teoría del cerebro. De esto se desprende que una teoría del cerebro, que tenga alguna aspiración de completarse, tiene que dar cuenta de la escritura de esta teoría. Y aún más fascinante, el escritor de esta teoría tiene que dar cuenta de sí mismo. Traducido al dominio de la cibernética; el cibernético, al ingresar a su propio dominio, tiene que dar cuenta de su propia actividad. Entonces, la cibernética se convierte en cibernética de la cibernética o en Cibernética de segundo orden³² (Foerster 2003, pág. 289).

En 1957, Foerster funda el *Biological Computing Lab* en la Universidad de Illinois con el objetivo de estudiar los mecanismos de causalidad circular y retroalimentación en sistemas biológicos y sociales³³. Estos mecanismos se presentan como indicadores de que en el ámbito de la cibernética «se piensa circularmente, no linealmente³⁴» (Foerster 1997, pág. 19), razón por la que comenzaron a implementarse en el estudio de sistemas auto-organizadores³⁵. Heylighen & Joslyn (2001, pág. 21) ilustran las bases de

³² La traducción es mía.

³³ El principio de circularidad de Foerster implica al mismo tiempo un principio de recursividad, es decir, un conjunto de operaciones que se repiten sobre sí mismas.

³⁴ La tesis de la circularidad fue adoptada y, posteriormente, implementada por Maturana, quien la vinculó con su idea de autopoiesis al sugerir que «los sistemas vivientes forman una red de procesos de producción internos y circulares que los convierten en unidades limitadas al producir constantemente y, por lo tanto, mantenerse. Los sistemas autopoieticos son autonomos. Cualquier cosa que puede suceder dentro de ellos, lo que sea que puede penetrar y estimular, perturbar o destruirlos, está esencialmente determinado por su propia organización celular» (Maturana, cit. Poerksen 2001, págs. 47-48).

³⁵ En *Visión y perspicacia* [*Sicht und Einsicht*], Foerster desarrolla en profundidad este principio de circularidad a través del símbolo Uroboros. El observador y lo observado se interpenetran, dando lugar a una dimensión experiencial en la que ambos son inseparables. Cf. Foerster (1985).

esta idea valiéndose de un hipotético organismo acuático primitivo que participa en circularidad con su entorno. El comportamiento de este puede capturarse en una serie de representaciones $R=\{r_j\}$ y un conjunto de reglas de predicción $M_a: R \rightarrow R$, ambas acopladas por una función de percepción $P: W \rightarrow R$. La predicción M_a tiene éxito si logra anticipar lo que le sucederá a la predicción R bajo la influencia de la acción a . Esto significa que el estado predicho del modelo $r_2 = M_a(r_1) = M_a(P(w_1))$ debe ser igual al estado del modelo creado al percibir el estado actual del mundo w_2 tras el proceso $F_a: r_2 = P(w_2) = P(F_a(w_1))$; es decir, $P(F_a) = M_a(P)$. Para sobrevivir, este organismo debe permanecer en una zona a temperatura adecuada, moviéndose hacia abajo, buscando capas de agua más frías, o hacia arriba, buscando capas de agua más cálidas, cuando sea necesario. Su percepción es una variable de temperatura única con tres estados: $X = \{\text{demasiado caliente, demasiado frío, temperatura adecuada}\}$. Su variedad de acción consiste en los tres estados $Y = \{\text{ascender, descender, no hacer nada}\}$. El conocimiento del control del propio organismo se integra en un conjunto de pares de percepción-acción, o lo que es lo mismo, una función del tipo $f: X \rightarrow Y$. De entre las $3^3 = 27$ funciones posibles, la única que permitirá superar el criterio de éxito es aquella que opere con las reglas: *demasiado caliente* \rightarrow *descender*, *demasiado frío* \rightarrow *ascender*, *temperatura adecuada* \rightarrow *no hacer nada*. Esta última regla podría ser reemplazada por: *temperatura adecuada* \rightarrow *ascender* o *temperatura adecuada* \rightarrow *descender*, lo que supondría un mayor gasto de energía, pero, en combinación con las reglas anteriores, mantendría al organismo en un bucle de retroalimentación negativa alrededor de la temperatura ideal. Las restantes posibles combinaciones perturbarían esta retroalimentación estable, causando un comportamiento que eventualmente aniquilará al organismo. Al igual que este hipotético organismo, los seres vivos revierten los resultados de su proceso de interacción con el medio en pautas conductuales que les permiten regular su actividad constructiva. Según la complejidad del sistema, el alcance observacional y constructivo de la realidad variará desde sistemas cognitivos muy primitivos capaces solo de percibir la existencia del entorno a sistemas más complejos y evolucionados capaces de captar la existencia de otros sistemas e incluso de percibirse a sí mismos. Como consecuencia, aquellos sistemas que compartan la misma arquitectura cognitiva, tanto a nivel de estructura como de procesos implicados, compartirán una misma realidad, determinada esta por las operaciones internas y las limitaciones del propio sistema.

En 1976, Foerster acuña por vez primera el término constructivismo radical como un nuevo modo de abordar el estudio de los «procesos de percepción, de comportamiento y de comunicación, a través de los cuales los hombres forjamos propiamente, y no encontramos por casualidad nuestras realidades individuales»³⁶ (Foerster, cit. Watzlawick 2009, pág. 140).

Desde el momento en que son sólo los organismos vivientes quienes pueden ser calificados como observadores, parecería que la tarea de desarrollar tal teoría [una teoría del observador] correspondería al biólogo. Pero él mismo es un ser viviente, lo cual significa que en su teoría él tiene que dar cuenta no solamente de sí mismo, sino también de su capacidad para escribir esa teoría [...] Contradiendo el problema clásico de la indagación científica que postula en primer lugar un “mundo objetivo” invariante a la descripción científica, y luego intenta escribir su descripción, sentimos ahora el reto de desarrollar un “mundo subjetivo” invariante a la descripción, es decir, un mundo que incluya al observador: este es el problema (*Op. cit.*, pág. 64).

Para refrendar su visión del constructivismo radical y mostrar que «las observaciones no son absolutas sino relativas al punto de vista de un observador» (Foerster 1991, pág. 63), Foerster recurre al principio de codificación no diferenciada, según el cual en los estados de la actividad de una célula nerviosa no se codifica la naturaleza física del estímulo, sino su intensidad³⁷. La actividad cerebral se estimula a partir del nivel de excitación de los *inputs* procedentes del entorno, los cuales no codifican ningún tipo de información cualitativamente fiable sobre la naturaleza física de este (Roth 2003, 2006, 2013). De este modo, el cerebro se ve obligado a construir y generar significados por comparación y combinación de eventos sensoriales elementales que tienen que a su vez son examinados de acuerdo con criterios internos.

En la respuesta de una célula nerviosa no es la naturaleza física de la causa de la excitación la que está codificada. Solamente se codifica ‘cuánta’ intensidad de esta causa de excitación, es decir, un ‘cuanto’ pero no un qué. [...] Esto es asombroso, pero no debemos sorprendernos, ya que “allí fuera” efectivamente no hay

³⁶ Es interesante observar cómo las propuestas de Foerster guardan estrecha relación con las ideas de Uexküll y su mundo circundante —*Umwelt*—. El ciclo funcional —*Funktionkreis*— que Uexküll describe usando como ejemplo la garrapata responde al mundo cognitivo propuesto por Foerster, el cual se presenta como resultado de la actividad constructiva del observador, la única realidad a la que este tiene acceso.

³⁷ El biólogo alemán Gerhard Roth suscribe la tesis de Foerster de la siguiente manera: «Tan solo una pequeña fracción de la totalidad de los estímulos externos nos alcanza, y solo una parte de esa fracción se transforma en actividad eléctrica, el código uniforme del sistema nervioso, y en mensajeros químicos. El cerebro ha producido la realidad que experimentamos y en la que vivimos. Sin embargo, el cerebro no tiene contacto directo con el medio ambiente y, por consiguiente, la transición del entorno físico y químico es una ruptura radical. Todo cuanto vemos, escuchamos, olemos, pensamos y sentimos es el resultado de un gigantesco rendimiento de construcción del cerebro» (Roth, cit. Poerksen 2001, pág. 118).

luz ni color, sólo existen ondas electromagnéticas; tampoco hay “allí afuera”, sonido ni música, sólo existen fluctuaciones periódicas de la presión del aire; “allí afuera” no hay ni calor ni frío, sólo existen moléculas que se mueven con mayor o menos energía cinética media, y demás. Finalmente, “allí afuera” no hay, con toda seguridad, dolor (Foerster 1991, págs. 41-42).

Este principio de codificación no diferenciada de Foerster fue recuperado posteriormente por Maturana y Varela en su teoría autopoietica, introduciendo así la idea de cierre operacional, según la cual

el sistema nervioso es una red cerrada de neuronas que interactúa, de manera que un cambio en la actividad de una neurona siempre lleva a un cambio en la actividad de otras neuronas, directamente a través de un efecto sináptico, o indirectamente a través de la participación de algún agente físico o químico intermedio. Por lo tanto, la organización del sistema nervioso como una red neuronal finita queda definida por relaciones de circularidad en las interacciones neuronales generales en la red [...] Por tanto, mientras la red neural se cierre sobre sí misma, su fenomenología es la fenomenología de un sistema cerrado en el cual la actividad neuronal siempre lleva a actividad neuronal (Maturana & Varela 1994, págs. 124-125).

La característica fundamental de todo sistema es una red cerrada de neuronas que interactúan de modo que cualquier cambio en el estado de actividad relativa de un grupo conduzca a un cambio en el estado de actividad de otro grupo. Las perturbaciones sensoriales del exterior pueden, en el mejor de los casos, modular el proceso de construcción de la dinámica del sistema, pero no determinarla, ya que son las estructuras y procesos que integran la arquitectura cognitiva del sistema los que predeterminan qué percibir. Los seres vivos, como sistemas autopoieticos, se encuentran limitados y determinados por su arquitectura interna, de modo que las perturbaciones que puedan sufrir provocarán alteraciones permitidas por su organización estructural y no por una instrucción contenida en el agente perturbante³⁸.

Junto a Foerster, otro de los máximos representantes del constructivismo radical durante el siglo XX fue el filósofo y cibernético alemán Ernst Von Glasersfeld³⁹ (1917-2010), quien en relación a la definición propuesta por Foerster, añade que

el saber es construido por el organismo viviente para ordenar lo más posible el flujo [...] de la experiencia en hechos repetibles y en relaciones relativamente seguras. Las posibilidades de construir semejante orden están determinadas por los pasos previos de la construcción y esto quiere decir que el mundo “verdadero” se manifiesta exclusivamente cuando nuestras construcciones naufragan. Pero como sólo podemos describir y explicar el naufragio con precisamente esos conceptos que hemos empleado para construir las estructuras fallidas, nunca nos será dada una imagen del mundo a la cual podamos culpar del naufragio (Glasersfeld 1981, pág. 36).

Para Glasersfeld (1995), el mundo que experimentamos lo construimos automáticamente nosotros mismos. La relación entre nuestro conocimiento del mundo y cómo el mundo es realmente está sujeta a una adaptación o ajuste en sentido funcional, o lo que es lo mismo, a una equivalencia de relaciones funcionales, siendo la dinámica interna del propio sistema la que permite configurar estas equivalencias como un todo coherente en el mundo experiencial. Yendo un paso más allá en su visión particular del constructivismo radical, y retomando las tesis de Foerster, Glasersfeld afirma que

la actividad cognoscitiva del hombre no puede llevar a una imagen verdadera y certera del mundo, pues sólo se limita a indagar e inferir, luego esa actividad puede ser vista como forjando llaves con cuya ayuda el hombre puede abrir caminos que lo conduzcan a los fines que elige [...] Que una llave funcione bien o no, no depende de que encontremos una cerradura adecuada con la que aquella encaje, sino única y solamente de que nos facilite el camino hacia el fin que queremos alcanzar (Glasersfeld 1981, pág. 31).

Para ilustrar esta idea, se vale del principio de selección natural:

Los conceptos de variación y selección (natural), tomados de la teoría de la evolución de Darwin, abrieron la posibilidad de sustituir la noción tradicional de verdad de los filósofos como una representación correcta, o al menos aproximadamente correcta, de la realidad objetiva, por la de adaptación⁴⁰ (Glasersfeld 1995, pág. 50).

Este juicio de semejanza rescata algunas de las propuestas planteadas Uexküll y Piaget en lo relativo a la naturaleza evolutiva del cerebro, como la idea de que este asuma como imperativo biológico servir como

³⁸ Por ejemplo, la alergia a ciertos tipos de polen es un rasgo característico de la población, pero el polen no es el causante de dicha alergia, ya que mientras algunas personas se ven afectadas, otras no. Es, por el contrario, la propia fisiología de algunos individuos la que desencadena la reacción alérgica ante la presencia del polen.

³⁹ Como apreciación biográfica, vale la pena destacar el hecho de que Glasersfeld estuviera inmerso de joven en diferentes comunidades lingüísticas, de ahí que su políglota experiencia le llevará a suscribir la hipótesis de Sapir-Whorf acerca de que la estructura del mundo se troquele estrechamente con la lengua materna, interviniendo esta última de forma decisiva en cómo interpretamos y representamos la realidad que nos rodea.

⁴⁰ La traducción es mía.

instrumento adaptativo en el mundo de la experiencia. En este sentido, la adaptación biológica consistiría en salvaguardar una imagen plausible del entorno que permita al organismo adaptarse de forma exitosa, aunque esta no responda fielmente a cómo el mundo es realmente⁴¹.

Desde un punto de vista muy general nuestro conocimiento es útil, relevante, capaz de sobrevivir [...] si resiste al mundo de la experiencia y nos capacita para hacer ciertas predicciones o para hacer que ciertos fenómenos (apariciones, eventos, experiencias) ocurran o para impedir que ocurran. Si no nos presta ese servicio, el conocimiento se vuelve cuestionable, indigno de confianza, inútil y en última instancia devaluado a mera superstición. Desde un punto de vista pragmático, consideramos las ideas, las teorías y las “leyes de la naturaleza” como estructuras que están permanentemente expuestas a nuestro mundo de la experiencia (desde el cual las hemos derivado) y o bien son válidas o no (Glaserfeld 1981, pág. 25).

Ante la radicalidad de las tesis de Glaserfeld, Paul Watzlawick (1921—2007), teórico y psicólogo austríaco, incorpora al constructivismo radical su enfoque sistémico de la comunicación, una orientación analítica definida a través de los procesos psicológicos que rodean la comunicación humana y que describe esta como un «conjunto de elementos en interacción en donde toda modificación de uno de ellos afecta las relaciones entre los otros elementos» (Marc & Picard 1992, pág. 39). Este enfoque sistémico entiende la realidad como una convención interpersonal en la que el lenguaje se erige como la matriz que integra todas y cada una de las actividades humanas (Watzlawick 1992).

En su obra *La realidad inventada* de 1981, Watzlawick describe un experimento realizado por el psicólogo norteamericano Alexander Bavelas en la Universidad de Stanford con ánimo de refrendar su enfoque sistémico de la comunicación. En este experimento, el evaluador [S₁] leía en voz alta al evaluado [S₂] una larga serie formada por pares de números, por ejemplo, 31 y 60. Después de que S₁ leyera cada pareja, S₂ debía responder si dichas parejas de números guardaban o no algún tipo de relación. Cuando S₂ preguntaba qué tipo de relación debía de encontrar, S₁ respondía que la finalidad del experimento consistía precisamente en descubrir dichas reglas de correspondencia. De este modo, se creaba en S₂ la impresión de que el experimento obedecía a un test de ensayo-error. Así, S₂ comienza a responder aleatoriamente según criterios que va configurando en su esquema mental. En un primer momento, S₁ califica las respuestas como incorrectas, pero con el tiempo deja ver que va aumentando el número de respuestas acertadas. De este modo, S₂ comienza a confiar en los criterios que él mismo ha construido para vislumbrar cierto grado de relación entre las parejas de números. Lo que S₂ no sabe es que no existe relación alguna entre sus respuestas y la reacción de S₁, ya que estas han sido seleccionadas de forma aleatoria. S₁ emplea la curvatura de Gauss para hacer creer a S₂ que las respuestas son incorrectas al comienzo y luego correctas con mayor frecuencia. Esto genera en S₂ una falsa sensación de realidad que subyace a los pares de números a la que se aferra aun cuando S₁ revela que no existe ninguna relación. La convicción de S₂ se fundamenta en que la relación construida es real. S₂ ha construido una realidad, pese a creer haberla descubierto.

Las contribuciones de Foerster, Glaserfeld y Watzlawick sobre el modo de operar de la cognición consolidaron lo que se conoce como constructivismo radical, una nueva aproximación al estudio de los sistemas observacionales que originó una serie de propuestas de base científica que pusieron cada vez más en tela de juicio la presunta veracidad del conocimiento. Por vez primera, el observador y lo observado pasaron a considerarse existencias interrelacionadas que desempeñan roles irreductibles e intercausales en la configuración de la realidad experiencial, una realidad que responde al resultado de un conjunto de operaciones limitadas a la dinámica interna del propio sistema orientadas a proveer una imagen plausible del mundo en términos de viabilidad.

4. CONCLUSIONES

El siglo XX trajo consigo un cambio de paradigma de raigambre interdisciplinar orientado a acometer el estudio de las bases neurofisiológicas de la cognición. Los estudios realizados por los primeros etólogos

⁴¹ En su introducción a *La realidad inventada*, Watzlawick ilustra la base del constructivismo radical de Glaserfeld de la siguiente manera: «El capitán de un navío debe cruzar un estrecho de mar durante una noche oscura y tempestuosa, sin conocer la configuración del estrecho, sin carta marina que lo oriente, sin faro y otro auxilio de la navegación. Naufragará o bien, si pasa el estrecho volverá a navegar en el seguro mar abierto. Si el buque da contra los arrecifes y el capitán pierde la nave y su vida, el naufragio demuestra que el derrotero elegido no era el correcto para atravesar el estrecho. Por así decirlo, el capitán descubrió aquello que el derrotero no era. Pero si en cambio llega sano y salvo a cruzar el estrecho, esto demuestra sólo que el derrotero tomado no lo llevó a chocar, en sentido literal, con ningún arrecife. Ese éxito no le enseña el capitán nada sobre la verdadera configuración del estrecho de mar, nada sabe sobre si estuvo siempre seguro o próximo a la catástrofe en cada momento: pasó a través del estrecho como un ciego. Su derrotero calzó las condiciones para él desconocidas del lugar, pero no correspondía necesariamente con él, [...] es decir, que el derrotero no correspondía con la verdadera naturaleza del estrecho. Es fácil imaginar que la verdadera configuración del estrecho de mar ofreciera tal vez derroteros mucho más breves y más seguros» (Watzlawick 1994, pág. 18).

evolutivos, cuyos trabajos se muestran feudatarios de las tesis de Kant —las investigaciones de Lorenz sobre la evolución filogenética del conocimiento, las contribuciones de Uexküll relativas al mundo circundante y al ciclo funcional de los organismos, el concepto de autopoiesis introducido por Maturana y Varela, las investigaciones de Piaget que situaban la acción como piedra angular en la construcción del conocimiento—, convergieron en un nuevo modo de abordar el conocimiento, así como en una nueva forma de entender el vínculo que se establece entre el observador y lo observado. Este nuevo modo de aproximarse al estudio de la cognición recibe el nombre de constructivismo, una corriente filosófica asentada en las siguientes premisas:

- El conocimiento no se adquiere objetivamente de forma pasiva, sino que se construye subjetivamente de forma activa como un modo particular de situarse frente a la experiencia.

- La naturaleza de la cognición es adaptativa y su imperativo biológico persigue el ajuste y la viabilidad, o lo que es lo mismo, una adecuación funcionalmente exitosa con el entorno que garantice la supervivencia del sistema.

- El cerebro humano es autorreferencial y organizacionalmente cerrado, por lo que este solo puede recurrir a sus propios recursos internos para asignar significado.

- El significado se configura a partir de la comparación y combinación de unidades sensoriales sobre la base de experiencias e interpretaciones anteriores.

- El aprendizaje obedece a la organización innata de reglas de funcionamiento originadas en el transcurso de la evolución y en los principios de organización adquiridos en interacción con el entorno.

- La objetividad consiste en pensar que una observación puede hacerse sin observador.

Ahora bien, a pesar del respaldo empírico con el que cuentan las premisas teóricas del constructivismo, esta corriente filosófica plantea importantes interrogantes. En primer lugar, si la realidad obedece a un acto de construcción activo por parte del observador, ¿no debería haber tantas realidades como observadores? Asimismo, de haber tantas realidades como observadores, el lenguaje utilizado para describir esas realidades también debería ser distinto, ¿no supondría esto un impedimento para la comunicación? ¿Y qué hay de la ciencia? ¿Acaso los modelos y teorías de las que se nutre la investigación científica no funcionan como representaciones abstractas y universales con las que dar cuenta de una presunta realidad objetiva más allá de toda impresión subjetiva? Veamos qué tiene que decir el constructivismo como filosofía de la ciencia al respecto.

CAPÍTULO II

CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO

El verdadero viaje de descubrimiento no consiste en buscar nuevas tierras, sino en ver con nuevos ojos.

MARCEL PROUST

1. INTRODUCCIÓN

Desde que la mente humana es vista como un producto de la evolución, el enfoque evolutivo puede extenderse a los productos de la mente, es decir, a actividades epistémicas como la ciencia.

FRANZ M. WUKETITS

En el caso de nuestra especie, *Homo sapiens*, la visión es, sin duda alguna, el sentido más desarrollado e inmediato del que disponemos a la hora de configurar nuestra imagen del mundo. Con el fin de garantizar su supervivencia, nuestros antepasados cazadores-recolectores tuvieron que aprender a distinguir a partir de la observación la forma, cualidades y pautas de comportamiento de cientos de animales y plantas. Un fruto globuloso de tallo grueso y color púrpura causaba una muerte segura, mientras que otro de tallo largo verdoso con hojas rosadas resultaba ser beneficioso para combatir el cansancio, y otro color marrón que florecía en épocas de estío se prestaba como un buen remedio para mitigar el dolor durante el parto. Del mismo modo, las habilidades para la caza se implementaron conforme a la suma de la experiencia cotidiana. La creación de lazos de cooperación entre varios miembros para cazar resultó ser algo tremendamente efectivo, permitiendo obtener toneladas de carne, grasa y pieles de animales en una sola tarde de esfuerzo colectivo, así como secar, ahumar y congelar el alimento para su posterior consumo. Como resultado de este proceso de aprendizaje intuitivo-experiencial con el medio, *Homo sapiens* recopiló con el tiempo una gran cantidad de información botánica, zoológica, topográfica y social basada en sus patrones de interacción con el mundo circundante. Pero con el advenimiento de la ciencia, y con ella su titánico esfuerzo por desentrañar la «realidad oculta» (Greene 2013) que subyace al mundo visible, los esquemas de conocimiento basados en la experiencia cotidiana se mostraron insuficientes, por lo que nuestra especie se vio ante la necesidad de incorporar modelos que le permitieran dar cuenta de las leyes y principios que regían ese nivel de realidad oculto a los sentidos; sin embargo, cuanto más ha ahondado la ciencia en el estudio de la física del mundo, más se ha ido encontrando con que esta no es para nada como habíamos imaginado.

2. EL MUNDO DEL OBSERVADOR Y EL MUNDO OBSERVADO

Lo que yo prefiero es ver, porque solo viendo puede un hombre de conocimiento saber.

CARLOS CASTAÑEDA

La visión, además de ser el vector de acceso más inmediato del que goza nuestra especie a la hora de percibir el mundo, es también el más codiciado en la práctica observacional de la ciencia. La presencia de un observador se vuelve determinante en la captura de los patrones y regularidades percibidas en el comportamiento de cualquier fenómeno natural, así como en su ulterior recogida de datos y formalización teórica. Es el observador el que pone en relación los dominios de la ciencia y la cognición. El hecho de que ambos dominios —ciencia y cognición— asuman como principal cometido la acumulación de un cuerpo solvente de datos con el que configurar un esquema coherente y relativamente estable del mundo, conduce a una reconsideración acerca de lo que comúnmente se entiende por conocimiento, y más concretamente por conocimiento científico.

Antes de entrar en materia, considero oportuno rescatar las palabras de Demócrito, quien ya en sus *Cánones* distingue entre dos formas de conocimiento:

Dos son las formas de conocimiento: una genuina, otra oscura. En la oscura se incluye todo lo siguiente: vista, oído, olfato, gusto, tacto. La genuina se distingue de esta [...] Cuando la oscura no puede ver con mayor detalle, ni oír, ni oler, ni gustar ni percibir por el tacto, sino que con mayor sutileza (Demócrito 2008, pág. 287).

Si asumimos tal distinción, y adoptando una postura un tanto provocativa, podría decirse que la ciencia se presenta como el conocimiento oscuro por excelencia, ya que esta considera que la realidad es tal y como se manifiesta ante el testimonio suministrado por los sentidos dado el fundamento empírico en el que se apoya desde la era medieval. Si bien es cierto, por sentidos debemos entender sentidos potenciados por modelos que no cumplen otra función más que la de actuar como prótesis genuinas de nuestras ventanas sensoriales que a su vez nos brindan un nuevo: el cálculo, con el que interpretar cuantitativamente la realidad. Ahora bien, reconocer la importancia de los sentidos en la investigación no implica relegar la

razón a ocupar un papel de mera anfitriona. Ilustremos esto con un ejemplo tomado de la misma historia de la ciencia.

En 1608, Hans Lippershey ideó un dispositivo óptico que le permitió observar objetos situados a larga distancia. No fue sino Galileo quien, por primera vez en la historia, dirigió este al cielo, concretamente hacia el planeta Júpiter, pudiendo observar este como un disco redondo planetario junto al cual se atisbaban cuatro puntos brillantes, a los que, en honor a su mecenas, denominó estrellas mediceas. Al contemplarlos con cierta asiduidad, observó que estos cuatro puntos —los que hoy conocemos como sus satélites mayores: Io, Europa, Ganimedes y Calisto— cambiaban de posición de un día para otro e incluso en pocas horas; a veces, ni se observaban los cuatro, sino meros eclipses cuando uno de ellos pasaba detrás del disco o cuando proyectaban sus sombras sobre este. Este hecho marcó un hito sin precedentes en la historia de la ciencia experimental, pues la imposibilidad de retomar una visión geocéntrica de los cielos supuso el inicio de una nueva era del conocimiento en la que el telescopio se alzó como una fuente de incalculable valor para ahondar más y más en lo que hasta entonces había permanecido oculto.

Al igual que ocurre con los instrumentos observacionales, como el telescopio, los modelos en ciencia desempeñan un papel similar. Al funcionar como prolongaciones exosomáticas de nuestros sentidos, los modelos cumplen fundamentalmente dos tareas: en primer lugar, penetrar en aquel nivel de realidad que queda fuera toda observación inmediata, y, en segundo lugar, formalizar las regularidades y patrones de comportamiento de ese nivel de realidad a un lenguaje inteligible: el lenguaje matemático. El constructivismo como filosofía de la ciencia permite acometer el estudio de esta relación que se establece entre el mundo físico y su formalización teórico-matemática a partir de un examen de la dinámica interna de cualquier sistema de observación, incluido el cerebro humano, en el que se pueden distinguir cuatro niveles operatorios:

i. El nivel de lo no observable [NNO]; es decir, aquel nivel de realidad no accesible a los sentidos y que se busca explicar (*explanandum*). Este nivel se inscribe en muchas ocasiones dentro de una dimensión meramente teórica o especulativa, y parte de su inteligibilidad para su posterior estudio.

ii. El nivel de lo observable [NO]. Los fenómenos observados en este nivel se presumen como emergentes del NNO.

iii. El nivel de representación neural [NRN], determinado por las estructuras y procesos cognitivos que configuran la arquitectura neural del sistema.

iv. El nivel de las teorías [NT]. En este nivel tiene lugar la formalización teórico-matemática del comportamiento de un fenómeno (*explanans*) originado en el NNO.

La ciencia, al igual que la cognición, busca encontrar regularidades en la estructura y la dinámica del mundo físico. En el ámbito de la experiencia, el sistema percibe que determinados fenómenos se comportan de acuerdo con un patrón repetitivo, cuyas regularidades tienen su origen en la estructura física del NNO, pero cuya percepción depende estrechamente de la dinámica interna del sistema. Estas regularidades se extraen mediante detectores de características realizadas neuralmente en diferentes niveles de abstracción que son relevantes para una formulación teórica particular (Essen et al. 1992; Hubel & Wiesel 1968). Podría decirse que ambos dominios —ciencia y cognición— parten de la suposición de que existe una «realidad oculta» (Greene 2013) —NNO— inaccesible sensorialmente, pero que sí es responsable de las regularidades y patrones de comportamiento observados en el NO, de modo que para poder predecir y dar cuenta de los fenómenos observables en el NO es necesario estudiar los fenómenos ocultos del NNO que los originan. Para ello, el sistema de observación (en el caso de nuestra especie, el cerebro) aísla estados, transiciones y correlaciones que considera relevantes para salvar las regularidades observadas. Estos estados, transiciones y correlaciones tienen su origen en el NRN y se extienden al NT como una abstracción con el objetivo de generar un comportamiento funcionalmente exitoso (Glaserfeld 1995a; Maturana 1991; Roth 1992, 1994). En una primera fase, el sistema, tanto a nivel sensorial como neural, establece algún tipo de relación entre las regularidades y patrones de comportamiento observados en la física del mundo a partir de sus mecanismos internos de retroalimentación. En una segunda fase, el sistema procede a una descripción universal y abstracta de estos patrones y regularidades. Esta descripción abstracta y universal se presenta como el rasgo esencial del conocimiento científico y es la que permite reducir las regularidades y patrones observados en el NO e intuidos en el NNO a una síntesis matemática de su comportamiento. Esta síntesis matemática se articula conforme a un modelo que, lejos de funcionar como una fiel cartografía de la física del mundo, permite acometer predictivamente su estudio a partir del cálculo, haciendo encajar su estructura teórico-matemática con los resultados experimentales.

Si decimos de algo que “encaja”, tenemos en mente una relación diferente. Una llave “encaja” en la cerradura cuando la abre. Ese encajar describe una capacidad de la llave, pero no de la cerradura. Por los ladrones de profesión sabemos demasiado bien que existe una gran cantidad de llaves con formas diferente de las nuestras pero que no por eso dejan de abrir nuestras puertas [...] Desde el punto de vista del constructivismo [...] estamos frente al mundo circundante como un bandido ante una cerradura que debe abrir para adueñarse del botín (Glaserfeld 1994, pág. 23).

3. DEL REALISMO AL CONSTRUCTIVISMO CIENTÍFICO

El mapa de una sola provincia ocupaba toda una ciudad, y el mapa del imperio, toda una provincia. Con el tiempo, esos mapas desmesurados no satisficieron, y los Colegios de Cartógrafos levantaron un mapa del imperio que tenía el tamaño del imperio y coincidía puntualmente con él. Menos adictas al estudio de la cartografía, las generaciones siguientes entendieron que ese dilatado mapa era inútil y no sin impiedad lo entregaron a las inclemencias del sol y de los inviernos. En los desiertos del oeste perduran despedazadas ruinas del mapa, habitadas por animales y por mendigos.

JORGE LUIS BORGES, *Del rigor de la ciencia*

Asumir la existencia de una realidad objetiva y poder dar cuenta de esta fielmente es la base del realismo científico. En palabras de Putnam: «Desde los presocráticos a Kant no hay ningún filósofo que, en sus principios elementales, irreductibles, no haya sido un realista metafísico» (Putnam, cit. Glaserfeld 1994, pág. 22). No cabe duda de que, en una primera aproximación al estudio del mundo, nada puede resultar más obvio que aceptar la creencia de una realidad a la que poder atribuir validez objetiva; no obstante, esto es todo cuanto es, una creencia.

Aunque adquirió notable interés a mediados del siglo XX, el debate filosófico en torno a si los modelos en ciencia obedecen a fieles descripciones de cómo es el mundo o si, por el contrario, estos funcionan como meros instrumentos diseñados para el cálculo y la predicción, se remonta a los albores del pensamiento occidental (Duhem 1985). Ya en el siglo V a.C., Platón, convencido de que los astros se desplazaban describiendo órbitas circulares uniformes, se propuso elaborar modelos geométricos que permitieran salvar⁴² el movimiento de los planetas: «¿Qué movimientos circulares, uniformes y perfectamente regulares deben ser admitidos como hipótesis para que sea posible salvar las apariencias presentadas por los planetas?⁴³» (Platón, cit. Duhem 1985, pág. 5). Esta aproximación al estudio del movimiento de los cuerpos celestes muestra una visión menos metafísica y más pragmática de la ciencia, ya que busca dar cuenta de la rotación planetaria y no desentrañar su más íntima naturaleza.

El objeto de la astronomía está aquí definido con mayor claridad: la astronomía es la ciencia que combina movimientos uniformes y circulares a fin de obtener un movimiento resultante como el de los astros. Cuando sus construcciones geométricas han asignado a cada planeta una trayectoria conforme a su órbita visible, la astronomía ha logrado su objetivo, porque sus hipótesis han salvado las apariencias⁴⁴ (*Op. cit.*, págs. 5-6).

Contrario a su maestro, Aristóteles considera que los meros artificios matemáticos se muestran insuficientes si no se constriñen al criterio más riguroso de la realidad física. Según el Estagirita, un mismo movimiento bien podría ser descrito a través de distintos métodos, por lo que resulta necesario apelar a la naturaleza de los elementos que comprende dicha explicación y, por consiguiente, vincularla con la realidad misma de esos movimientos.

Mientras Eudoxo y Calipo, empleando el método del astrónomo, controlaban sus hipótesis examinando si estas salvaban o no las apariencias, Aristóteles buscaba gobernar la elección de estas hipótesis a través de proposiciones resultantes de ciertas especulaciones sobre la naturaleza de los cuerpos celestes. El suyo es el método del físico⁴⁵ (*Op. cit.* pág. 7).

La controversia entre la visión platónica y la aristotélica sembró la semilla de la discordia acerca de si los modelos utilizados en ciencia funcionan como fieles representaciones de cómo es el mundo o si,

⁴² Con *salvar* se entiende la posibilidad de establecer predicciones sobre las regularidades y patrones de comportamiento de un fenómeno observado; en este caso, la órbita de los cuerpos celestes.

⁴³ La traducción es mía.

⁴⁴ La traducción es mía.

⁴⁵ La traducción es mía.

por el contrario, solo permiten salvar su apariencia. Durante los siglos posteriores, las investigaciones realizadas en el terreno de la astronomía originaron dos posiciones contrapuestas: por un lado, la que abogaba por una visión de la ciencia más enclavada en la tesis platónica, y, por otro, la que compartía una postura más enraizada en la visión aristotélica, tendente a atribuir valor metafísico a los modelos. En la vertiente platónica destacaron los trabajos desarrollados por Simplicio en el siglo VI. Estos partían de la premisa de que «el objetivo [de la ciencia] es descubrir qué hipótesis nos permiten salvar fenómenos, no hay razón para asombrarse si diferentes astrónomos intentan salvar los fenómenos a través de diferentes hipótesis⁴⁶» (Simplicio, cit. Duhem 1985, pág. 27). Basándose en una interpretación similar de la ciencia, Santo Tomás, en *Comentario a De Coelo*, plantea que una hipótesis científica no constituye

en absoluto una clase de *demonstratio*, sino tan solo una *suppositio*; es decir, que ni siquiera el perfecto acuerdo con las observaciones bastaría para verificarlas, puesto que siempre cabría suponer otra hipótesis que diese igualmente cuenta de los fenómenos [...] Las hipótesis formuladas no tienen por qué ser necesariamente verdaderas; aunque de hecho puedan salvar los fenómenos observados, no por ellos habrá que decir que son verdaderas, pues las apariencias celestes acaso podrían explicarse por medio de otros procedimientos aún no atisbados por los hombres (Santo Tomás, cit. Elena 1985, pág. 77).

Una postura que reitera en su *Summa Theologica*:

En astrología se considera establecida la teoría de las excéntricas y epiciclos, porque así se pueden explicar las apariencias de los cuerpos celestes; sin embargo, alguna otra teoría bien pudiera también explicarlas⁴⁷ (Santo Tomás 1920, pág. 160).

Incluso, algunos autores llegaron a adoptar ambas posturas. Tal fue el caso de Ptolomeo, quien en su *Almagesto* se muestra proclive a una interpretación platónica de la ciencia según la cual «[el] astrónomo ha de intentar encontrar hipótesis que permitan salvar el movimiento aparente de las estrellas⁴⁸» (*Op. cit.* pág. 17), mientras que en *Las hipótesis de los planetas* adopta una postura más ligada a la visión de Aristóteles:

Aunque situemos a los modelos con sus movimientos y las clases de posición simple en las esferas mayores que hemos descrito con sus movimientos, aún nos falta describir las formas de los cuerpos en los que hemos incluido estas esferas. En esto adoptamos lo que es adecuado a la naturaleza de los cuerpos esféricos, a lo que nos obligan los principios que configuran la esencia que siempre permanece inalterable (Ptolomeo 1987, pág. 91).

Actualmente, el debate filosófico acerca de si los modelos funcionan como meros instrumentos con los que salvar fenómenos (Rivadulla 2006, 2011, 2014, 2015) o si, por el contrario, existe algún tipo de correspondencia real entre la estructura teórico-matemática de un modelo y la estructura física del mundo (Cartwright 1983; Popper 1994; Fraasen 2008), se presenta como irreconciliable. Para algunos autores, el *telos* (del griego τέλος, “fin” o “propósito”) de la ciencia es la búsqueda de la verdad. El conocimiento científico progresa por aproximación a la verdad, ya sea por acopio de todo el conocimiento acumulado a lo largo de la historia —realismo convergente— (Laudan 1986), o bien resolviendo discrepancias entre paradigmas tras una revolución científica (Kuhn 2004). Los enunciados científicos, una vez formalizados matemáticamente y verificados empíricamente, son considerados verdaderos, llegando algunos a elevarse a la categoría de leyes o principios universales. Esta tesis, fiel heredera del pensamiento aristotélico, se conoce como realismo científico y, pese a sus diferentes versiones y paradojas irreconciliables, ha sido y sigue siendo en la actualidad la postura predominante en filosofía de la ciencia.

Desde el momento en que Aristóteles inaugura la teoría de la verdad como correspondencia, afirmando que la verdad o falsedad de un enunciado se determina únicamente por la forma en que este se corresponde con el mundo, muchos han sido los autores que han asumido los postulados metafísicos del Estagirita (Kitcher 1993; Popper 1982; Psillos 1999; Putnam 1975; Sklar 2002; Thagard 1988). Entre los muchos, podemos traer a colación al mismo Sir Karl, quien en *El mito del marco común* se cuestiona acerca del presunto valor de verdad atribuido a los modelos en ciencia: «¿Puede un modelo ser cierto? No lo creo. Cualquier modelo, ya sea en física o en las ciencias sociales, debe ser una simplificación excesiva⁴⁹» (Popper 1994, pág. 172). Aun con todo, dado su talante realista, Popper se aferra a la idea de que «la ciencia apunta a la verdad, o a acercarse a la verdad⁵⁰» (*Op. cit.*, pág. 174), idea que reitera más adelante al sugerir que «el modelo de Copérnico parece ser una mejor aproximación a la verdad que el de Ptolomeo, el de Kepler ofrece una mejor aproximación que el de Copérnico, la teoría de Newton una aún mejor

⁴⁶ La traducción es mía.

⁴⁷ La traducción es mía.

⁴⁸ La traducción es mía.

⁴⁹ La traducción es mía.

⁵⁰ La traducción es mía.

aproximación, y la de Einstein mejor aún⁵¹» (*Op. cit.*, pág. 176). Con esta reflexión, Popper aboga por una visión del progreso científico por aproximación a la verdad, un planteamiento que Laudan transcribiría posteriormente en términos técnicos como realismo convergente y al que se sumarían eminentes filósofos de la ciencia del siglo XX, como Putnam (1975), Boyd (1984), Thagard (1988), Kitcher (1993) o Sklar (2002).

La grata acogida que ha tenido el realismo científico entre muchos miembros destacables de la comunidad científica, ha originado una eclosión y proliferación de diferentes subtipos. Como consecuencia directa, algunos defensores de esta postura filosófica se han decidido a acotar semántica y conceptualmente lo que se entiende en la actualidad por realismo científico, extrayendo los denominadores comunes presentes en todas y cada una de sus versiones. Tal es el caso de Brown (1994), para quien el realismo científico «tiene tres ingredientes⁵²» (Brown 1994, pág. 81) esenciales:

1. Las teorías científicas o son verdaderas o son falsas, y lo que las hace verdaderas o falsas es algo que existe de forma completamente independiente de nosotros.
2. Es posible llevar a cabo elecciones racionales, aunque falibles, entre teorías rivales.
3. La ciencia persigue la verdad.

Por su parte, Psillos (1999, pág. xvii) introduce una clasificación más rigurosa ateniéndose a tres tesis:

1. Una tesis metafísica, según la cual el mundo tiene una estructura de tipo natural definida e independiente de la mente.
2. Una tesis semántica que considera las teorías científicas como descripciones condicionadas por la verdad que entraña su dominio de competencia, por lo que estas pueden ser verdaderas o falsas.
3. Una tesis epistémica, según la cual los términos de los que hacen uso las teorías asumen referencia empírica; por lo que, si una teoría asume valor de verdad, los términos de los que hace uso son reales y pueblan el mundo físico.

Otra clasificación, aunque más antigua, es la propuesta por Haack (1987), quien apela a cuatro tesis:

1. Una tesis teórica, según la cual las teorías científicas son genuinamente verdaderas o falsas.
2. Una tesis acumulativa, según la cual las nuevas teorías científicas complementan a las teorías anteriores con un mayor grado de precisión predictiva, siempre y cuando ambas compartan el mismo dominio de aplicación.
3. Una tesis progresiva, según la cual la ciencia progresa por aproximación a la verdad.
4. Una tesis optimista que sugiere que las teorías científicas son aproximadamente verdaderas.

Por último, Diéguez⁵³ desglosa el realismo científico en cinco tesis, las cuales «no tienen por qué ser aceptadas conjuntamente» (Diéguez 1998, pág. 78):

1. Una tesis ontológica por la que las entidades postuladas por las teorías cobran existencia real; es decir, estas asumen referencia empírica.
2. Una tesis epistemológica que sugiere que las teorías científicas proporcionan un conocimiento adecuado tal y como el mundo es realmente, con independencia del papel que asuma el observador.
3. Una tesis teórica, según la cual las teorías científicas son susceptibles de ser verdaderas o falsas.
4. Una tesis semántica que determina la veracidad o falsedad de las teorías científicas en función de su correspondencia con la realidad.

⁵¹ La traducción es mía.

⁵² La traducción es mía.

⁵³ Además de su clasificación, Diéguez introduce un nuevo tipo de realismo denominado realismo intencional. Esta modalidad de realismo sugiere que cuando los científicos proponen sus teorías, pretenden afirmar la existencia de las entidades correspondientes a los términos —incluidos teóricos— de dichas teorías. Cf. Diéguez (1998).

5. Por último, una tesis progresiva que sugiere que la ciencia progresa recapitulándose con cada innovación científica y aproximándose cada vez más a la verdad.

En una primera incursión, parece una empresa un tanto quijotesca extraer una definición clara de realismo científico⁵⁴, pues, dentro de la amplia actividad investigadora que profesa esta corriente filosófica, algunos autores han decidido emanciparse de la visión tradicional e introducir nuevas aproximaciones con las que, abandonando la noción de verdad, ya sea como valor de los enunciados científicos o como aspiración u objetivo de la propia ciencia, buscan un nuevo modo de abordar la correspondencia real presuntamente existente entre el mundo físico y su formulación matemática. Entre estas nuevas aproximaciones, destaca el realismo estructural de Worrall (1989), heredero de la tesis estructuralista de Poincaré, con el que su autor busca garantizar la inferencia realista de la verdad como mejor explicación del éxito de la ciencia: «Las ecuaciones expresan relaciones y si las ecuaciones son verdaderas es porque las relaciones siguen siendo reales» (Worrall 1989, pág. 118). Por su parte, Giere incluye una aproximación interesante que apuesta por la idea de que «los modelos son constructos humanos, pero algunos pueden proporcionar un mejor ajuste con el mundo que otros⁵⁵» (Giere 1992, pág. 97), un enfoque que aporta «una aproximación cognitiva al realismo explícito de la reciente sociología de la ciencia» (Giere 1986, pág. 321).

Como puede comprobarse, la gran variedad de formas distintas que adopta el realismo científico dificulta la posibilidad de brindar una caracterización unívoca que unifique bajo un denominador común los rasgos compartidos entre todos y cada uno de los diferentes tipos. Ahora bien, de embarcarnos en tal empresa, podríamos aducir que el realismo científico es la postura filosófica heredera, en mayor o menor medida, de la tesis aristotélica de la verdad como correspondencia. A diferencia del realismo científico, el constructivismo rechaza toda pretensión a la verdad y apela a la viabilidad predictiva, o ajuste funcional, de un modelo como único criterio válido para su aceptación, ya que entiende esta correspondencia como una relación de equivalencias funcionales y no como una presunta semejanza, verosimilitud o isomorfismo entre la formulación teórico-matemática del modelo y la estructura física del mundo. El éxito de un modelo no reside en su grado de veracidad con respecto a la parcela de realidad estudiada, sino que viene determinado por su precisión en el cálculo y el alcance predictivo de sus hipótesis de partida. Al igual que ocurre con el alcance sensorial de cualquier sistema de observación, el cual se ve limitado por las estructuras y procesos que integran su arquitectura cognitiva, es la estructura teórico-matemática de un modelo la que delimita su dominio de aplicabilidad y su viabilidad predictiva, tal y como veremos a continuación.

4. MODELOS EN CIENCIA Y FILOSOFÍA

Sólo podemos, pues, salir al paso de la injusticia o vaciedad de nuestras aserciones exponiendo el modelo como lo que es, como objeto de comparación —como, por así decirlo, una regla de medir— ; y no como prejuicio al que la realidad tiene que corresponder.

LUDWIG WITTGENSTEIN, *Investigaciones filosóficas*

En el siglo XVIII, el físico Daniel Bernoulli (1700—1782) consideró la posibilidad de que los gases estuvieran compuestos de partículas que se desplazaban permanentemente y sin dirección fija. Para ilustrar esta idea, tomó como ejemplo una mesa de billar donde las bolas chocaran entre sí y con las bandas dentro de un espacio tridimensional como analogía al comportamiento de las partículas que componen el gas. Como Bernoulli, a comienzos del siglo XX, en su obra *Economía y sociedad*, Max Weber (1864—1920) postuló un conjunto de acciones sociales a las que denominó tipos ideales, análogos a una versión unidimensional y reducida de fenómenos sociales más complejos. En 1956, Robert Solow sostuvo que el crecimiento económico dependía estrechamente del nivel tecnológico de un país. Para demostrarlo, hipostasió una economía cerrada en la que la renta fuera igual al producto y la población a la fuerza del trabajo. En una situación de estas características, el crecimiento solo podría producirse por un aumento de la oferta, siendo esta última el resultado de la inversión tecnológica, y esta a su vez de la inyección de capital. ¿Qué tienen en común todos estos casos? Pues que en todos ellos se ha hecho uso de una versión idealizada de un fenómeno para, en primer lugar, inferir consecuencias prácticas y, en segundo, presumir algún tipo de correspondencia entre esta simplificación y el fenómeno estudiado. Esta versión simplificada de la realidad, o de un aspecto de la misma, es lo que comúnmente se conoce en ciencia como un modelo.

⁵⁴ Para otras clasificaciones de realismo científico, véase Niiniluoto (1987), Moulines (1991) y González (1993).

⁵⁵ La traducción es mía.

Física

A comienzos del siglo XVI, Nicolás Copérnico ideó un modelo heliocéntrico del Sistema Solar que hizo tambalear la cosmovisión geocéntrica heredada desde el siglo IV a.C. Con su modelo, defendió que la razón por la que las estrellas parecían orbitar alrededor de la Tierra se debía a que esta giraba sobre su propio eje de rotación y que el movimiento aparente de los cielos obedecía a una ilusión creada por el desplazamiento del observador. Es más, la Tierra no solo no estaba inmóvil, tal y como sostenía Aristóteles, sino que tampoco se hallaba en el centro del universo, y los movimientos presuntamente anómalos de los planetas podían ser explicados si se aceptaba la hipótesis de que estos orbitaban alrededor del Sol en lugar de circunvalar la Tierra.

Biología

Los trabajos realizados por Wilhelm Weinberg y Godfrey H. Hardy que integran la síntesis mendeliana con la teoría de la evolución, se fundamentaron en modelos predictivos que facilitaron el estudio de muchos fenómenos originados en el terreno de la biología, como la interacción de dominancia, la mutación o el cruzamiento selectivo.

Economía

Los modelos en economía permiten expresar las relaciones entre las variables consideradas significativas dentro del funcionamiento de un sistema económico. Ejemplo de ello es el modelo *input-output* del que se valió Wassily Leontief para analizar la interdependencia de industrias en una economía. Este modelo, cuya formulación matemática se formaliza en un sistema de ecuaciones lineales, permite el estudio de la actividad económica a partir del álgebra lineal⁵⁶.

Lingüística

Los modelos lingüísticos permiten estudiar la tipología de distintas lenguas en función de cómo se configura su gramática. Podemos citar como ejemplo el modelo computacional de estados finitos, el cual permite el reconocimiento de lenguajes regulares, o el modelo de gramática generativa que, a partir de un conjunto de reglas formales, permite reproducir el modo en que se combinan los elementos constituyentes de una lengua, facilitando así una descripción estructural o análisis gramatical (Chomsky 1975, 1976, 1986).

Química

Algunos modelos químicos permiten la organización de la materia y su categorización. El modelo de estructura de Gilbert Newton Lewis de 1916, por ejemplo, a partir de la representación gráfica de iones y compuestos, posibilita el recuento exacto del número de electrones de valencia de un elemento que interactúan con otros o entre sí, formando enlaces simples, dobles o triples.

Asimismo, en disciplinas como la Antropología, la Sociología o la Etología, los modelos facilitan el análisis cuantitativo de ciertos fenómenos originados en el seno de un grupo, comunidad u organización política, como el crecimiento demográfico de un territorio o las relaciones de parentesco entre los miembros de una sociedad.

Dada la enorme importancia que los modelos asumen en todos los ámbitos disciplinares de la ciencia, muchos han sido los intentos por establecer una clasificación de los mismos de acuerdo a los diferentes tipos. Cristina Bicchieri, en su introducción a la versión italiana de la obra de Mary Hesse *Models and Analogies in Science*, incluye una tipología de las diferentes clases de modelos utilizados en ciencia que resulta muy ilustrativa a modo de caracterización general. Bicchieri menciona en primer lugar los modelos lógicos, resultantes de las posibles interpretaciones de un sistema axiomático. En segundo lugar, los modelos matemáticos, ligados al mundo mediante un conjunto de ecuaciones. En tercer lugar, los modelos analógicos, isomorfos con respecto a su objeto de estudio. En cuarto lugar, los modelos teóricos, articulados a partir de un conjunto de suposiciones acerca de cómo es el mundo. Y, en quinto lugar, los modelos imaginarios, sujetos a una idealización o especulación excesiva sobre algún aspecto de la realidad. Pues bien, de acuerdo a esta clasificación, si pensamos en cada uno de los diferentes tipos como propiedades independientes pero comúnmente compartidas por todos los modelos, estas resultarían fácilmente salvables entre sí. Por ejemplo, las ecuaciones que conforman la estructura matemática de un modelo deben ser solubles en el contexto de una teoría, convirtiendo a todo modelo matemático en un modelo teórico. Además, un modelo que busque dar cuenta de un aspecto de la realidad no observable exige de una idealización previa que permita acometer su estudio, lo que convierte a dicho modelo en imaginario.

⁵⁶ Si se cuantifica el valor monetario de un sector i a uno j , como Z_{ij} , y al mismo tiempo los bienes producidos que no entran de nuevo en el sistema productivo, como Y_i , se obtiene que la producción del sector i (X_i) sería igual a: $X_i = Z_{i1} + Z_{i2} + Z_{i3} + \dots + Z_{in} + Y_i$

Asimismo, las hipótesis de partida sobre las que se construyen los modelos obedecen, en ocasiones, al resultado de establecer correspondencias parciales de identidad, o analogías, entre diferentes dominios de experiencia, revelando así su naturaleza analógica.

Ahora bien, pese a que las propiedades matemática, teórica, analógica y especulativa o imaginativa, son fácilmente salvables entre sí, pensar en un modelo científico como si de un modelo lógico se tratara plantea algunos problemas. Para ilustrar esto, consideremos por un momento la ley de conducción del calor (Calvo 2006, pág. 46):

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla (k \nabla t) + q^*,$$

en la que ρ es la densidad del cuerpo, k es la conductividad térmica, c_p es el calor específico del cuerpo, q^* es la velocidad a la que se genera el calor por unidad de volumen, t es la temperatura y τ es el tiempo. El operador vectorial ∇ es el operador nabla, cuya formulación en coordenadas cartesianas tridimensionales se expresa de la siguiente forma:

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z},$$

donde \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} son los vectores unitarios en las direcciones de los ejes coordenados. Pues bien, si traducimos la primera ecuación a un lenguaje de lógica de predicados, el resultado sería el siguiente: $F(\rho, c_p, t, \tau) \leftrightarrow G(k, t, q^*)$. Como puede verse, el operador nabla ∇ presenta un problema, ya que al utilizar derivadas parciales de una variable con respecto a las magnitudes espaciales x , y y z , este escapa al alcance formal del lenguaje lógico. La dificultad presente en intentar reducir la profunda complejidad del mundo físico a un lenguaje lógico se debe a que las regularidades y patrones de comportamiento observados en este no obedecen fielmente al funcionamiento de un sistema axiomático, ya que, de ser así, sería posible deducir la inmensa mayoría de las leyes. Una teoría científica no se deriva de otra por inferencia lógica, así como de un modelo no se deduce otro de forma axiomática. Si consideramos la ley de Laplace: $\partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 + \partial^2 t / \partial z^2 = 0$, la cual expresa la dependencia de la temperatura t en un sólido respecto de las coordenadas espaciales, y recuperamos la ecuación anterior relativa a la conducción del calor, ¿sería posible derivar esta última a partir de la teoría de la termodinámica? ¿Se pueden deducir las leyes de la termodinámica a partir de una serie de axiomas? Lo cierto es que no, ya que, en primer lugar, la segunda ecuación no implica la primera, así como de la primera no se obtiene axiomáticamente la segunda. Ahora bien, si diseñamos un experimento en el que la conductividad térmica es constante, no existe variación de la temperatura con respecto del tiempo (ecuación de Poisson: $\Delta \varphi = f$) y no hay generación de calor interno, la ley de Laplace resultaría predictivamente exitosa y podría utilizarse.

A diferencia de un sistema axiomático, cuya estructura es demasiado rígida como para acomodarse a todo tipo de situaciones experimentales, los modelos en ciencia son flexibles. Las conjeturas matemáticas pueden verificarse axiomáticamente convirtiéndose en teoremas. Los trabajos realizados por el matemático Herald Helfgott durante los años 2012 y 2013 demostraron la conjetura de Goldbach, ahora teorema, según la cual todo número impar mayor que 5 puede expresarse como la suma de tres números primos. Como Helfgott, el matemático de origen rumano Preda Mihăilescu resolvió en 2002 la conjetura de Catalan, ahora conocida como el teorema de Mihăilescu, la cual establece que la única solución en el conjunto de los números naturales de $x^a - y^b = 1$ para $x, a, y, b > 1$ es $x = 3, a = 2, y = 2, b = 3$. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con la geometría euclidiana o la lógica proposicional, donde la validez de los teoremas se deduce axiomáticamente, en ciencia, es la corroboración empírica la que niega o da validez al alcance predictivo de un modelo, razón por la que el paso o la sustitución de un modelo por otro no responde a una inferencia o derivación lógica, sino a distintas suposiciones sobre la naturaleza física del mundo.

Al no operar de acuerdo a las reglas de inferencias propias de un sistema axiomático, los modelos en ciencia se contrastan empíricamente para determinar su validez, la cual no viene determinada por una presunta correspondencia real entre el modelo y la parcela de realidad estudiada, sino por la capacidad de este para, a partir de un conjunto de hipótesis y ecuaciones claramente formuladas, satisfacer una meta predictiva. Para ilustrar esto, supongamos que queremos calcular la antigüedad de un cráneo humano que contiene una tercera parte de carbono (^{14}C) (Marcellán, Casasús & Zarzo 1991, pág. 2). Si partimos de la hipótesis de que el número de átomos que se desintegran es proporcional a la cantidad de átomos totales, y sabiendo que el número de isótopos radioactivos se mantiene constante en un organismo vivo, es posible construir un modelo simplificado que permita datar la antigüedad del cráneo a partir de una simple ecuación:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -kN,$$

en la que $N(t)$ es el número total de átomos presentes en el instante t y k la constante de decaimiento para el $^{14}\text{C} \cong 0,000126$. Si consideramos que N_0 es el número de átomos en el instante $t = 0$, es decir, en el momento de la muerte

$$\frac{dN(t)}{dt} = -kN = 0;$$

$$N(0) = N_0$$

Al integrar, obtenemos $N(t) = N_0 e^{-kt}$. Cuando el cráneo tiene $N_0/3$ átomos de ^{14}C , $N(t) = N_0 e^{-kt} = N_0/3$. Así, el tiempo transcurrido se obtiene despejando t ,

$$t = \frac{\ln 3}{k} \cong 8719$$

Como puede comprobarse, es la viabilidad predictiva del modelo, y nada más, lo que determina en última instancia su validez empírica, así como su factible inclusión en el contexto de la investigación.

4.1. Éxitos y fracasos de los modelos en ciencia

En su afán por formalizar la física del mundo, la ciencia ha convertido la historia de la investigación en la historia de la modelización, decantándose por el estudio de sistemas simples —modelos— en detrimento de sistemas complejos —la realidad física—. Si por algo se caracteriza la ciencia es por su reduccionismo; es decir, por su capacidad para abstraer de la fenomenología observable todos aquellos aspectos que puedan resultar irrelevantes a la luz de la investigación.

A diferencia de la ciencia antigua, que buscaba una comprensión cualitativa y directa de los fenómenos, la ciencia moderna se basa en la construcción de modelos teóricos [...] de la realidad. Afortunadamente, y desde el siglo XVII, hemos salido del marasmo en que nos había sumido el intento por comprender directamente la realidad, y hemos aprendido a conquistarla indirectamente, dando un rodeo por la ruta de la modelización cuantitativa (Mosterín 2013, pág. 130).

Los modelos en ciencia permiten esta abstracción, reduciendo la profunda complejidad de la física del mundo a una síntesis matemática que permite predecir de su comportamiento. Es este éxito en la predicción lo que lleva a los modelos a encontrar su justificación epistemológica en el constructivismo, donde la idea de representar fielmente la realidad se ve sustituida por la de articular un conjunto de hipótesis y ecuaciones con las que acometer predictivamente su estudio mediante el cálculo.

A continuación, examinaré algunos de los problemas más recurrentes en el contexto de la investigación científica en torno al fenómeno de la modelización. Para ello, adoptaré el constructivismo como una factible filosofía de la ciencia con la que abordar el estudio de los modelos y, basándome en las premisas sobre las que esta corriente de pensamiento se asienta, mostraré cómo el éxito de un modelo reside en su viabilidad predictiva para adecuarse funcionalmente con los resultados experimentales, y no en proveer una imagen fiel de cómo el mundo es realmente.

4.1.1. Los casos límite y el problema de la inconmensurabilidad

El sino más hermoso de una teoría física es el de señalar el camino para establecer otra más amplia, en cuyo seno pervive como caso límite.

ALBERT EINSTEIN

La historia de la ciencia viene signada por el cambio. En 1687, la aparición de los *Principia* de la mano de Isaac Newton, y con ella su análisis y síntesis para la comprensión de las leyes de la naturaleza, incluida la gravedad, no solo instauró un cambio en el modo de entender la física de los cuerpos, sino toda una filosofía en su conjunto a la que el mismo Kant rinde tributo en su *Crítica*: «[Todos] los cambios tienen lugar con la ley que enlaza causa y efecto» (Kant 1997, pág. 220). El Modelo Mecanicista de Newton [MMN] puso el

broche de oro a un sinfín de observaciones y disertaciones teóricas realizadas durante siglos en el terreno de la astronomía, desde las impulsadas por los precursores de Ptolomeo en Grecia y Persia hasta las realizadas por los más destacados representantes científicos del siglo XV y XVI, como Nicolás Copérnico, Ticho Brahe o Johannes Kepler. Con la llegada del siglo XVII, y con él la publicación de los *Principia*, el MMN revistió de certeza una renovada visión de un mundo susceptible de ser estudiado en términos de materia y movimiento. Las entidades teóricas sobre las que operaba el MMN referían a corpúsculos materiales últimos, sólidos e impenetrables, que constituían la materia de los cuerpos y que originaban todo el conjunto de fenómenos físicos. El universo se presentaba como algo absoluto, siempre en reposo e inmutable, y los cambios ocurrían en el transcurso del tiempo que se pensaba como una dimensión sin conexión alguna con el mundo material y que fluía desde el pasado hacia el futuro.

Inspirados por los hallazgos astronómicos que el MMN trajo consigo —como el descubrimiento del cometa Halley y de los planetas Neptuno y, por aquel entonces, Plutón— los científicos comenzaron a extender los postulados de la mecánica newtoniana al movimiento de los fluidos y a las vibraciones de los cuerpos elásticos, e incluso al estudio del calor de los cuerpos, adquiriendo una cada vez mayor universalidad. Como consecuencia, el MMN comenzó a trascender poco a poco el dominio de lo científico y a invadir el ámbito religioso, donde muchos asumieron el éxito de sus postulados como un dogma de fe. Tal fue el caso de Cotes, quien en su prefacio de la segunda edición de los *Principia* afirma: “La teoría de esos cuerpos era totalmente desconocida para los astrónomos hasta que nuestro excelente autor la descubrió tan felizmente, demostrando su veracidad con las observaciones más seguras” (Newton 2011 [2ªed., 1729], págs. 15-16). Pero con el tiempo, las nuevas observaciones astronómicas revelaron que la órbita de algunos cuerpos en movimiento no obedecía fielmente las leyes de Kepler. La explicación residía en que, para derivar sus leyes de movimiento, Newton se vio obligado a despreciar toda atracción gravitatoria salvo la que tenía lugar entre cada planeta y el Sol —un claro ejemplo de reduccionismo científico—, lo que condujo a que los resultados obtenidos presentaran serias deficiencias al abordar el estudio de sistemas con más de dos cuerpos sujetos a mutua atracción gravitatoria, así como la estabilidad de las órbitas perturbadas.

El MMN se mantuvo inamovible hasta finales del siglo XIX, momento en que las contribuciones de Maxwell en el terreno del electromagnetismo sobre que la luz, además de ser finita, es constante, contradijeron la ley de adición de velocidades de la mecánica newtoniana. Este hecho contribuyó a la irrupción de un nuevo modelo: el Modelo Relativista de Einstein [MRE], tanto en su versión especial como general. Este nuevo MRE se erigía sobre dos principios básicos: en primer lugar, las leyes físicas son invariantes conforme a las transformaciones de Lorentz, o lo que es lo mismo, estas las mismas en todos los sistemas inerciales; y, en segundo lugar, la velocidad a la que pueden desplazarse los cuerpos o transmitirse señales entre ellos no puede exceder la velocidad de la luz en el vacío, ya que esta es una constante c idéntica para todos los observadores (Einstein 1905). La aparición del MRE no solo desestabilizó los postulados heredados, sino que impuso una nueva imagen del mundo inasequible a toda intuición sensible, en la que el espacio y el tiempo dejaban de constituir un marco fijo e inmutable y aparecían ligados en una misma entidad, y la gravedad pasaba a ser estudiada como una deformación en la geometría de este espacio-tiempo. La posterior constatación empírica del MRE a la hora de reinterpretar los nuevos desafíos de la física de su tiempo, empujó a muchos miembros de la comunidad científica, incluyendo al propio Einstein, a considerar la posibilidad de que el MMN funcionara como un caso límite del MRE:

Si se particularizan las ecuaciones de la teoría general de la relatividad al caso de que los campos gravitatorios sean débiles y de que todas las masas se muevan respecto al sistema de coordenadas con velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, entonces se obtiene la teoría de Newton como primera aproximación; así pues, esta teoría resulta aquí sin necesidad de sentar ninguna hipótesis especial, mientras que Newton tuvo que introducir como hipótesis la fuerza de atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los puntos materiales que interactúan (Einstein 1994, pág. 87-88).

En palabras de Landau y Lifshitz:

En el caso límite en que las velocidades de los cuerpos en movimiento son pequeñas respecto de la velocidad de la luz, se puede prescindir del efecto que el carácter finito de la velocidad de propagación de las interacciones tiene sobre el movimiento. La mecánica relativista se reduce entonces a la mecánica ordinaria basada en la hipótesis de la propagación instantánea; esta mecánica es la llamada newtoniana o clásica. El paso de la mecánica relativista a la clásica se puede conseguir formalmente determinando el límite para $c \rightarrow \infty$ de las formas de la mecánica relativista (Landau & Lifshitz 1992, pág. 3).

Una factible aproximación a la hora de estudiar los casos límite consiste en atender a la derivabilidad matemática⁵⁷. Si bien en este caso resulta posible derivar matemáticamente el MMN a partir del MRE, un nuevo problema aparece al atender a la dimensión semántica de los términos involucrados en

⁵⁷ Véase Anexo I.

ambos modelos. Entre los partidarios de esta aproximación semántica se encuentra Kuhn, quien llega a la conclusión de que no es posible establecer diálogo coherente alguno entre modelos que atribuyen una significación distinta a los términos sobre los que operan, tal y como ocurre con el MMN y el MRG.

Con todo, la derivación es espuria, al menos en este punto. Por más que los N_i sean un caso especial de las leyes de la mecánica relativista, no son las leyes de Newton. O al menos no lo son, si no se reinterpretan dichas leyes de un modo que hubiera resultado imposible antes de la obra de Einstein. Las variables y parámetros que representan en los E_i la posición espacial, el tiempo, la masa, etc., siguen apareciendo en los N_i , y siguen representando el espacio, el tiempo y la masa. Pero los referentes físicos de esos conceptos einsteinianos no son en absoluto idénticos a los de los conceptos newtonianos que llevan el mismo nombre [...] A menos que cambiemos las definiciones de las variables de los N_i , los enunciados que hemos derivado no son los newtonianos. Si las cambiamos, no podemos decir con propiedad que hayamos derivado las leyes de Newton, al menos no en ningún sentido de derivar actualmente aceptado por todo el mundo [...] No se ha logrado mostrar que las leyes de Newton sean un caso límite de las de Einstein, pues en el paso al límite no solo han cambiado las formas de las leyes, sino que hemos de alterar al mismo tiempo los elementos estructurales fundamentales de que se compone el universo al que se aplican (Kuhn 2004, pág. 179-180).

Tiene lógica. Si la masa es constante en el MMN pero no lo es en el MRE, el primer modelo no puede constituir un caso límite del segundo. Así lo expresa Sneed:

La función de masa en mecánica clásica de partículas y la función de masa en teoría especial de la relatividad han de ser consideradas como dos funciones teóricas que aparecen en teorías diferentes de la física matemática. No se debería esperar, pues, que los medio para determinar los valores de una de ellas necesariamente tengan nada que ver con la determinación de los valores de la otra. Ciertamente es un hecho interesante que la mecánica clásica de partículas se encuentre en una relación de reducción con respecto a la realidad especial, y que las funciones de masa en ambas teorías estén en correspondencia con esta relación de reducción. Pero esto no debe oscurecer el hecho de que estas funciones tienen propiedades formales diferente y que, en este sentido, están asociadas con conceptos diferentes (Sneed 1971, págs. 305-306).

En la misma línea, Feyerabend realiza la siguiente reflexión:

En física clásica prerrelativista el concepto de masa [...] era absoluto en el sentido de que la masa de un sistema no estaba influenciada [...] por su movimiento en el sistema de coordenadas elegido. En relatividad, empero, la masa se ha convertido en un concepto relativo, cuya especificación es completa si no se indica el sistema de coordenadas al que han de ser referidas todas las descripciones espacio-temporales. Desde luego, los valores obtenidos en la medición de la masa clásica y de la masa relativista concordarán en el dominio D' en el que se vio que los conceptos clásicos eran útiles. Pero esto no significa que lo que se mide en ambos casos sea lo mismo: lo que se mide en el caso clásico es una propiedad intrínseca del sistema considerado, mientras que lo que se mide en el caso relativista es una relación entre el sistema y ciertas características de D' . Es pues imposible definir los conceptos clásicos exactos en términos relativista, o relacionarlos con ayuda de una generalización empírica (Feyerabend 1981, pág. 81-82).

Esta aproximación semántica al estudio de los casos límite implica asumir que no es posible establecer diálogo alguno entre el MMN y el MRE, ya que cada uno adopta una visión particular del mundo. Si bien es cierto, cuando un modelo —MMN— se presupone como caso límite de otro —MRE—, la derivabilidad se vuelve posible desde un punto de vista matemático, pero no desde un punto de vista que apele a la dimensión semántica de los términos involucrados, ya que estos podrían no adquirir —y, de hecho, no adquieren— la misma referencia empírica. Este diálogo irreconciliable entre dos modelos competidores por una descripción completa de la realidad física se presenta como un hecho recurrente en la historia de la ciencia y se enmarca dentro del conocido problema de incompatibilidad interteórica. La transición de la mecánica newtoniana a la mecánica relativista ilustra con particular claridad este problema. En el caso de la masa, esta se conserva en el MMN, mientras que en el MRE se transforma, lo que lleva a deducir que «la masa de Newton [...] no es traducible a la masa de Einstein» (Moulines 2015, pág. 99), ya que, aunque el término empleado sea el mismo, su significado no lo es.

4.1.2. El problema de incompatibilidad (inter)teórica: Schwarzschild y los agujeros negros

Pero también es verdad que aquellos eran tiempos oscuros en los que un hombre debía pensar cosas que se contradecían entre sí.

UMBERTO ECO, *El nombre de la rosa*

A la hora de analizar el problema de incompatibilidad interteórica, el MMN se vuelve una vez más paradigmático dado el gran número de aplicaciones metodológicas que ofrece (Rivadulla 2004b, págs. 141-

144). Entre las muchas, vale destacar su notable éxito predictivo en el cálculo de la masa del Sol: $M_{\odot} = 4\pi^2 d^3 / G_N p^2$, así como de la Tierra: $M_{\oplus} = gr^2 / G$, siendo $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ y $M_{\oplus} = 5,9 \times 10^{30} \text{ kg}$, respectivamente. El MMN también permite calcular con alto grado de precisión la densidad crítica ρ_c del universo: $\rho_c = 3H^2 / 8\pi G$. Si consideramos un modelo esférico de universo: $V = 4\pi r^3 / 3$, con una velocidad de recesión $v_e = \sqrt{2GM/r}$, y hacemos uso de la ley de Hubble, donde $v_e = Hr$, basta con elevar al cuadrado ambos miembros de la ecuación y sustituir M por v , obteniendo así: $H^2 r^2 = 2Gv/r$. Al reemplazar por:

$$H^2 r^2 = \frac{2G \frac{4\pi r^3}{3} \rho_c}{r},$$

obtenemos al simplificar la densidad crítica: $\rho_c = 3H^2 / 8\pi G_N$.

Además del cálculo de la masa del Sol y de la Tierra, así como de la densidad crítica del universo, el MMN permite también calcular con alto grado de precisión el número de cuerpos estelares de nuestra galaxia: la Vía Láctea. Conociendo su forma de espiral barrada, la distancia del Sol con respecto al centro del bulbo galáctico (7,97 kpc) y su trayectoria orbital alrededor del centro ($v \sim 251 \text{ km/s}$), siendo esta de un periodo $p \sim 2,25 - 2,50 \times 10^8$ años, basta con introducir estos datos en las ecuaciones de Kepler y reemplazar $M = M_g$, obteniendo así un valor aproximado de $2.5 \times 10^{11} \pm 1.5 \times 10^{11}$ masas estelares. Jan Oort fue el primero en calcular el número de masas estelares en la Vía Láctea midiendo la distancia del Sol al centro de esta. El número de masas estelares que Oort predijo fue $\sim 1 \times 10^7$. Posteriormente, en su estudio de la rotación de las galaxias en 1932, postuló la existencia de una nueva componente de materia oscura en la física del mundo al observar que las estrellas se movían a una velocidad mayor de la que se pensaba. La posible existencia de esta nueva componente, imperceptible, desestabilizó los fundamentos de la física teórica de aquel momento, pues, de acuerdo con los postulados del MMN, la velocidad orbital de las estrellas más alejadas del centro de la galaxia debía reducirse con la distancia. Años después, en 1957, Vera Rubin sugirió que la mayoría de las estrellas en galaxias espirales se desplazaban casi a la misma velocidad, siendo la velocidad orbital de los cuerpos estelares más alejados del bulbo galáctico aproximadamente constante (Rubin et al. 1980, págs. 71-487). Esta afirmación se vio reforzada por ulteriores descubrimientos. En 1959, Louise Volders comprobó que la galaxia espiral M33 no rotaba tal y como predecía el MMN, pues según este la materia ubicada en el halo galáctico debía orbitar alrededor del centro de la galaxia de forma similar al modo en que los planetas orbitan en torno al Sol, ya que la velocidad orbital promedio de un cuerpo a una distancia específica de la mayor parte de distribución de masa debe reducirse de forma inversamente proporcional al cuadrado del radio de su órbita; además, la velocidad de rotación no solo no se reducía, sino que permanecía constante. En la actualidad, la curva de rotación de los halos galácticos no es el único fenómeno que desafía los principios del MMN. Otro ejemplo serían las ondas gravitacionales, ondulaciones en la curvatura del espacio-tiempo que originan ondas a la velocidad de la luz. El MMN no toma en consideración este fenómeno, ya que los postulados newtonianos no fueron pensados para operar en dominios de intensa gravedad, como en las proximidades de un agujero negro.

Un agujero negro de Schwarzschild es un objeto matemático que representa una región del espacio-tiempo definida por un parámetro, su masa, y delimitada por un horizonte de sucesos⁵⁸. En la métrica de Schwarzschild, el intervalo de tiempo propio viene dado por la siguiente fórmula:

$$d\tau = \left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right)^{1/2} dt$$

Siendo el radio de Schwarzschild $r_s = 2GM/c^2$, si introducimos estos datos en la ecuación anterior, obtenemos:

$$d\tau = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{1/2} dt$$

En términos de frecuencia:

$$f_o = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{1/2} f_e,$$

siendo f_o y f_e , la frecuencia observada y emitida, respectivamente. Pues bien, teniendo en cuenta esto, y sabiendo que el desplazamiento gravitacional hacia el rojo viene dado por:

⁵⁸ Véase Anexo II.

$$z \approx \left(\frac{f_e}{f_o} \right) - 1,$$

si hacemos uso del MMN, el resultado es el siguiente:

$$z \approx \left(1 - \frac{r_s}{2r} \right)^{-1} - 1$$

$$\lim_{r \rightarrow r_s} z = 1$$

Una predicción no compatible con el estado observacional, ya que, según los resultados del MMN, la luz seguiría siendo visible con una frecuencia equivalente a la mitad de la emitida por la estrella⁵⁹. Por el contrario, si hacemos uso del MRE, el resultado es distinto:

$$z \approx \left(1 - \frac{r_s}{r} \right)^{-1/2} - 1,$$

$$\lim_{r \rightarrow r_s} z = \infty$$

Esto muestra que cuando $z = \infty$ en distancias menores que r_s , la luz no puede ser observada debido a la intensa fuerza gravitatoria. Una predicción bastante acertada al tratarse de un agujero negro.

La métrica de Schwarzschild introduce una solución para un campo gravitacional externo de un cuerpo estacionario, descargado, no giratorio y esféricamente simétrico. Esta solución se muestra predictivamente exitosa para fotones, pero inadecuada para estrellas binarias donde las masas pueden ser de magnitud similar. En el caso de un agujero negro de Schwarzschild, la masa es estacionaria y altera el campo gravitacional, y, por consiguiente, la geometría del espacio-tiempo, razón por la que los términos con los que opera el MMN, como espacio absoluto, tiempo y movimiento, dejan de ser aplicables. El éxito del MRE a la hora de acometer predictivamente fenómenos originados en entornos de intensa gravedad, como en las proximidades de un agujero negro, reside en haber redefinido las nociones heredadas de espacio y tiempo, así como la naturaleza estrictamente causal de los fenómenos físicos. Mientras que el MMN, el espacio y el tiempo se perciben como absolutos y presuntamente eternos, en el MRE el tiempo puede sufrir contracciones y expansiones y el espacio concebirse tan dinámico como la materia. En consecuencia, la noción de fuerza como explicación de los fenómenos gravitacionales pasa a describirse en términos de geometría curva del espacio-tiempo debido a la presencia de cuerpos masivos.

Este problema de incompatibilidad interteórica que media entre dos modelos competidores por dar cuenta de una teoría unificada de la realidad física se acentúa a medida que profundizamos en el dominio de la microfísica, donde nuevos modelos aparecen para salvar los fenómenos cuánticos.

Es en escalas de distancias tan cortas que encontramos la incompatibilidad fundamental entre la relatividad general y la mecánica cuántica. La noción de una geometría espacial suave, en el principio central de la relatividad general, es destruida por las fluctuaciones violentas del mundo cuántico en escalas de corta distancia. En escalas ultramicroscópicas, la característica central de la mecánica cuántica —el *principio de incertidumbre*— está en conflicto directo con la característica central de la relatividad general: el modelo geométrico uniforme del espacio (y del espacio-tiempo) (Greene 2001, págs. 129-130).

En palabras de Smolin: «Hemos podido dividir el mundo en dos reinos. En el reino atómico, donde reina la física cuántica, generalmente podemos ignorar la verdad [...] En el otro ámbito de gravitación y cosmología [...] a menudo podemos ignorar los fenómenos cuánticos» (Smolin 2007, pág. 5).

⁵⁹ Pese a la ineficacia predictiva del MMN en dominios en los que actúan campos gravitacionales intensos, en lo que respecta al desplazamiento de la luz, Newton ya había considerado la posible desviación de un fotón como consecuencia directa de su teoría de la gravitación. En su *Optiks (Libro III, Pregunta 1)*, se pregunta: «¿No actúan acaso los cuerpos sobre la luz a distancia y por su acción doblan sus rayos, y no es esta acción (*ceteris paribus*) más fuerte a menor distancia?» (Newton 1704, pág. 132). La reconstrucción del enfoque newtoniano para la desviación de la luz viene dada por: $\alpha = (2Gm_\odot / r_\odot) c^2 \text{ rad}$, siendo $\alpha = 0''$.⁸⁷ De igual modo, en 1916, Einstein se plantea la posibilidad de que «los rayos de luz se propagan de modo curvilíneo en campos gravitacionales» (Einstein 1999, pág. 65). En el MRE esta formulación viene dada por: $\alpha = (4Gm_\odot / r_\odot) c^2 \text{ rad}$. Al resolver, se obtiene un valor de $1''$.⁷⁵

4.1.3. El triunfo predictivo del modelo de cuerpo negro

La densidad espectral de la radiación de cuerpo negro representa algo absoluto, y la búsqueda de lo absoluto implica la más suprema de las búsquedas.

MAX PLANCK

La investigación de la radiación de cuerpo negro comenzó con el estudio de las líneas de absorción en el espectro solar por parte de Gustav Robert Kirchhoff en 1862. Kirchhoff introdujo la noción de cuerpo negro para sugerir una fuente ideal de luz que absorbiera toda la radiación que incidiera sobre ella, pero que, al mismo tiempo, emitiera radiación solo en función de su temperatura. Esta idea se expresa a través de la radiación térmica de Kirchhoff: $\epsilon_\lambda/\alpha_\lambda = K_\lambda(T)$, en la que $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$, siendo la distribución de intensidad K_λ una función universal que depende únicamente de la temperatura y la longitud de onda. En este sentido, hablamos de radiación de cuerpo negro cuando el objeto está en equilibrio termodinámico; es decir, la radiación emitida por un cuerpo negro es idéntica en su distribución de intensidad a la radiación de equilibrio contenida en una cavidad de cualquier material para el cual $\alpha_\lambda \neq 0$ en todas las longitudes de onda. El tipo de luz emitida es un indicador de su temperatura. Cuanto más alta es la temperatura del cuerpo negro, más brillante es la luz que emite.

Un cuerpo negro es, por tanto, una idealización. Las estrellas no son cuerpos negros perfectos, ya que estas no se encuentran en equilibrio termodinámico. Además, las partículas que las constituyen colisionan continuamente entre sí e interactúan con el campo de radiación absorbiendo y emitiendo fotones. Ahora bien, aunque la naturaleza de las estrellas no corresponda fielmente a la de un cuerpo negro, este último resulta en predictivamente satisfactorio en el estudio de la emisión de luz estelar y en el cálculo de la temperatura de la superficie solar. Suponiendo que el Sol fuera un cuerpo negro, la energía total emitida por la unidad de superficie y tiempo vendría dada por la ley de Stephan-Boltzmann: $E = \sigma T_e^4$, donde T_e es la temperatura efectiva y $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ la constante de Stephan-Boltzmann. La luminosidad solar ℓ es la energía emitida en forma de fotones por unidad de tiempo por el Sol: $\ell = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$, en cuya formulación la temperatura que se considera en la superficie de la estrella es T_e . En la superficie de la Tierra —a una distancia $d = 150 \times 10^6 km$ del Sol—, la luminosidad solar $\ell = 4\pi d^2 e$ corresponde a un punto de la superficie solar de un Sol extendido con un radio que alcanza la Tierra. Siendo e la radiación solar por unidad de área, hacemos coincidir ambas expresiones para obtener: $4\pi R^2 \sigma T_e^4 = 4\pi d^2 e$. Al utilizar la constante solar:

$$e_\odot = \sigma T^4 \left(\frac{4\pi R}{4\pi D} \right)^2 = 1,366 W m^{-2},$$

donde σ es la constante de Stephan-Boltzmann, R es el radio del Sol ($695,7 \times 10^3 km$) y D es la distancia entre el Sol y la Tierra, despejamos T_e para obtener $T_\odot = 5772 K$ como la temperatura de la atmósfera solar. El Sol, al igual que el resto de cuerpos estelares, no obedece fielmente a un cuerpo negro. La absorción de luz a diferentes longitudes de onda por diversos átomos e iones bloquea parte del flujo de radiación hacia el exterior y esto debe compensarse emitiendo más luz a otras longitudes de onda. Sin embargo, la aplicación del modelo de cuerpo negro resulta predictivamente exitosa al calcular la temperatura de la superficie solar.

Otro ejemplo del éxito del modelo de cuerpo negro reside en su capacidad para estudiar con alto grado de precisión los espectros estelares. Suponiendo que las estrellas fueran genuinos cuerpos negros, estas deberían cumplir con la ley de desplazamiento de Wien: $\lambda_{max} T = b$, donde T es la temperatura del cuerpo negro y λ_{max} es la longitud de onda del pico de emisión en metros. Según esta ley, existe una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura; es decir, a medida que aumenta la temperatura del cuerpo, el máximo de su distribución de energía se desplaza hacia longitudes de onda más cortas. Como el color de una estrella está determinado por su temperatura, cuanto mayor sea la temperatura de una estrella, mayor será su tendencia a emitir en ultravioleta, y cuanto más fría sea, mayor su tendencia a emitir en rojo o infrarrojo. La luz emitida por un elemento químico a una temperatura apropiada, descompuesta en sus colores constituyentes cuando se dispersa a través de un prisma, es lo que denominamos su espectro. Los sólidos, líquidos incandescentes y los gases densos calientes emiten espectros continuos, mientras que los gases calientes difusos emiten líneas brillantes. El Sol, como cualquier otro cuerpo estelar, también emite su propio espectro. El espectro de las estrellas está constituido por un continuo, análogo al de un cuerpo negro a la misma temperatura que la estrella. Sobre el continuo se superponen líneas de emisión brillante, o líneas oscuras de absorción, que son emitidas por los elementos químicos que constituyen la atmósfera de la estrella. Los espectros de emisión

se producen cuando la luz incide directamente en el prisma, mientras que los espectros de absorción se producen cuando la radiación pasa a través de un medio absorbente que suprime las líneas del espectro de emisión. Al comparar los espectros de las estrellas con los espectros de los elementos conocidos obtenidos en el laboratorio, podemos determinar su composición. Los espectros estelares, con un corrimiento hacia el violeta o hacia el rojo, de acuerdo con la mayor o menor temperatura de la estrella, se comportan como se espera que lo hagan conforme a la ley del desplazamiento de Wien, lo que indica que el modelo de cuerpo negro, pese a no corresponder fielmente con la física de las estrellas, resulta predictivamente exitoso en el estudio de la radiación estelar.

4.1.4. El paradigma subatómico

Vemos el mundo a través de un cristal oscuro.

WOLFGANG PAULI

Durante las primeras décadas del siglo XX, el desarrollo de la teoría cuántica de la mano de físicos como Niels Bohr, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg supuso una ruptura del mecanicismo tradicional que redefinió por completo la idea de realidad. A comienzos del siglo, los científicos fueron testigos directos de cómo a raíz de las nuevas resoluciones experimentales, su visión del mundo se derrumbaba ante la nueva experiencia de la realidad subatómica. En palabras de Heisenberg: «Esta violenta reacción ante la evolución de la física moderna tan solo se podrá comprender advirtiendo que los fundamentos de la física han comenzado a moverse, y que ese movimiento ha causado la sensación de que la ciencia va a quedar separada de la tierra⁶⁰» (Heisenberg 1963, pág. 145). Einstein experimentó el mismo sobresalto cuando por primera vez entró en contacto con la nueva realidad subatómica: «Todos los intentos que hice para adaptar el fundamento teórico de la física a este conocimiento fracasaron rotundamente. Era como si hubieran quitado la tierra de debajo de mis pies, sin dejarme ningún fundamento sólido sobre el cual poder construir» (Einstein, cit. en Schilpp 1949, pág. 45). Los nuevos y sorprendentes descubrimientos gestados en el seno de la física cuántica exigían profundos cambios en conceptos arraigados desde hacía siglos en la investigación científica, como espacio, tiempo, materia, causa o efecto. De estos cambios emergió una nueva visión del mundo que incorporó nuevas perspectivas con las que abordar el estudio de la realidad.

En su obra *Mente y materia*, Schrödinger expone la siguiente reflexión:

El mundo es una construcción de nuestras sensaciones, percepciones y recuerdos. Conviene considerar que existe objetivamente por sí mismo. Pero no se manifiesta, ciertamente, por su mera existencia. Su manifestación está condicionada por acontecimientos especiales que se desarrollan en lugares especiales de este mundo nuestro, es decir, por ciertos hechos que tienen lugar en un cerebro. Se trata de un tipo muy peculiar de implicación, que sugiere la siguiente pregunta: ¿qué propiedades específicas distinguen estos procesos cerebrales y los capacita para producir esta manifestación? ¿Podemos averiguar qué procesos materiales tienen esta capacidad y cuáles no? O más simplemente: ¿qué clase de procesos materiales están directamente relacionados con la conciencia? (Schrödinger 2016, pág. 11).

En el mismo sentido, Heisenberg sostiene:

La realidad de la que podemos hablar nunca es la realidad *per se*, sino una realidad percibida, incluso, en muchos casos, una que nosotros mismos hemos moldeado. Se puede objetar que esta última afirmación admite que todavía existe, después de todo, un mundo objetivo totalmente independiente de nosotros y de nuestro pensamiento, un mundo que funcione o pueda funcionar sin nuestra ayuda, que realmente concebimos en nuestra investigación. Al principio, hay que responder a esta objeción tan verosímil que la expresión “hay” se deriva del lenguaje humano, por lo que no puede revelar algo que no se relacione con nuestra comprensión. Para nosotros existe solo un mundo en donde la expresión “hay” tiene significado⁶¹ (Heisenberg 1994, pág. 10).

En 1925, Heisenberg introduce la relación de indeterminación, un principio con el que muestra la imposibilidad de que determinados pares de magnitudes físicas observables y complementarias puedan medirse con precisión arbitraria.

Cualquier error al medir el momento, puesto que la masa suele estar bien determinada, conducirá a un error en la velocidad. Y es precisamente el conocimiento simultáneo de la posición y la velocidad lo esencial para saber dónde estará un objeto en el futuro. Si sabemos cuál es la rapidez de un objeto, pero tenemos una idea

⁶⁰ La traducción es mía.

⁶¹ La traducción es mía.

poco exacta de dónde está, nos encontramos igual de mal o peor cuando se trata de predecir dónde estará en algún momento futuro (Heisenberg, cit. March 1988, pág. 256).

Las consecuencias de este principio fueron devastadoras para los defensores a ultranza del poder predictivo del que gozaba la ciencia hasta comienzos del siglo XX. La nueva conciencia científica se originó en medio de la incertidumbre de la investigación experimental al mismo tiempo que los nuevos estudios sobre el comportamiento de la materia subatómica situaban al observador como piedra angular en los resultados finales de la investigación.

Otra de las aportaciones que desestabilizó la ortodoxia científica fue el principio de complementariedad de Bohr, propuesto en 1927, que, en estrecha relación con el principio de indeterminación de Heisenberg, buscaba resolver el problema de la dualidad onda-corpúsculo de la materia subatómica. En palabras de Bohr:

Lejos de ser contradictorios, los diferentes aspectos de los fenómenos cuánticos revelados en condiciones experimentales que se excluyen mutuamente han de considerarse como complementarios, dando a esta palabra un nuevo sentido. Este punto de vista de la complementariedad significa, en modo alguno, una renuncia arbitraria a un análisis detallado de los fenómenos atómicos, sino que, por el contrario, es la expresión de una síntesis racional de toda la experiencia acumulada en este campo, experiencia que sobrepasa los límites entre los cuales el ideal de causalidad encuentra sus posibilidades naturales de aplicación (Bohr 1964, pág. 24).

Y más adelante, afirma:

No obstante, el asombroso poder de la mecánica cuántica, el hecho de que nos obligue a separarnos radicalmente de nuestro modelo habitual de explicación física y nos lleve especialmente a renunciar a la idea misma de determinismo, ha conducido a muchos físicos y filósofos a preguntarse si solo se trata de un recurso provisional o bien nos enfrentamos, en lo que concierne a la descripción objetiva, con un paso irrevocable. La dilucidación de este problema ha exigido una revisión radical de los fundamentos sobre los que se basa la descripción y comprensión de la experiencia física⁶² (*Op. cit.*, pág. 89).

La exploración del mundo cuántico puso de manifiesto la inusitada limitación de la herencia científica, originando una revisión radical de los postulados heredados que pervivieron como indiscutibles hasta comienzos del siglo XX. Esta ruptura de la imagen tradicional del mundo, unida al creciente grado de desasosiego e incertidumbre ocasionado por los nuevos resultados experimentales, derivó en un auténtico rechazo de los más respetados principios de la racionalidad.

4.1.4.1. El éxito empírico de los modelos nucleares

En 1910, John W. Nicholson y Arthur E. Haas mostraron que la relación $h\nu = e^2/r$ se cumple para todo electrón con carga eléctrica e que oscila en un átomo de hidrógeno de radio r , siendo h la constante de Planck. La imagen del átomo popularizada por Nicholson y Haas atrajo la atención de Bohr y lo estimuló a buscar un modelo atómico más satisfactorio: el Modelo Nuclear de Gota Líquida [MNGL]. Este modelo, propuesto independientemente por Niels Bohr y Jakov Ilich Frenkel en 1936, no buscaba representar fielmente la compleja estructura interna del núcleo atómico, sino salvar las energías de enlace neutrón-protón, así como algunos aspectos de los estados excitados que se reflejan en los espectros nucleares. Para ello, el MNGL interpreta el núcleo atómico como una gota de fluido de alta densidad, pero en esta escala nuclear, el fluido está constituido por nucleones —protones y neutrones— que se mantienen unidos gracias a la fuerza nuclear fuerte. Esta analogía entre fuerzas es la que da forma a la imagen de una gota idealizada de líquido. La energía de enlace nuclear como una función del número de masa A y el número de protones Z basados en el MNGL se expresa con la fórmula de Weizsaecker:

$$E_b(\text{MeV}) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A} \pm \delta(A, Z),$$

donde $a_V A$ es el término del volumen, $a_S A^{2/3}$ es el término de la superficie, $a_C Z^2 / A^{1/3}$ es el término de Coulomb, $a_A (A - 2Z)^2 / A$ es el término de asimetría y $\delta(A, Z)$ es el término de emparejamiento o interacción por pares. Cada uno de los términos que constituye esta fórmula tiene una base teórica. Los coeficientes a_V, a_S, a_C, a_A , y el coeficiente que aparece en la fórmula para $\delta(A, Z)$, se determinan empíricamente.

⁶² En una discusión con Einstein, y en relación con el problema de la distinción sujeto-objeto, Bohr denuncia «la esencial ambigüedad que nace de asignar atributos físicos a objetos implicados en fenómenos que no permiten distinción precisa entre el comportamiento propio de estos objetos y su interacción con los instrumentos de medida» (Bohr 1964, pág. 75).

A nivel cuántico se observa que la masa de un núcleo atómico es menor que la masa de los componentes individuales —protones y neutrones— que la forman. Esta no conservación de la masa está conectada a la famosa ecuación de equivalencia entre masa y energía de Einstein: $E = mc^2$, según la cual parte de la masa debe encontrarse en forma de energía de enlace entre esos componentes: $m_N = Zm_p + (A - Z)m_n - B/c^2$, donde m_N , m_p y m_n responden respectivamente a la masa del núcleo, la masa de un protón y la masa de un neutrón, siendo Z el número atómico —igual al número de protones—, A el número de masa —igual al número de nucleones— y $A - Z$ el número de neutrones, donde B es la energía de enlace entre todos los nucleones:

$$B = B_v (= a_v A) + B_s (= -a_s A^{2/3}) + B_c (= -a_c Z^2 A^{-1/3}) + B_a (= a_a (A_2 Z)^2 / A) + B_p$$

B_p representa el hecho de que los núcleos con un número apareado de protones y neutrones son más estables que aquellos con un número impar de ambos tipos. Ahora bien, asumiendo una simetría esférica para el núcleo del átomo, todos los medios computacionales concluyen que el radio $R = r_0 A^{1/3}$, siendo A la masa nuclear y $r_0 = 1,2 \sim 1,5 \times 10^{-13}$. Teniendo en cuenta que la masa del número A denota el número total de nucleones, o lo que es lo mismo, el número Z de protones más el número N de neutrones, y siendo la densidad de nucleones en el núcleo atómico:

$$n = \frac{A}{4\pi R^3/3} = \frac{3}{4\pi r_0^3} \approx 10^{38} \text{ nucleones/cm}^3$$

donde $R = r_0 A^{1/3}$ y $r_0 = 1,2 \sim 1,5 \times 10^{-13} \text{ cm}$, la densidad de la masa en el núcleo atómico sería: $\rho = n \times m \approx 1,45 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$, y la distancia promedio entre nucleones:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\pi R^3}{3A}} = \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3}} r_0 \approx 2,3 \times 10^{-13} \text{ cm},$$

siendo n, ρ y d constantes, y la energía de enlace nuclear proporcional a la masa (Rivadulla 2006): $\Delta E/A \approx \text{constante}$.

Al pensar el núcleo atómico como una gota líquida de alta densidad, el MNGL permite salvar la energía de enlace neutrón-protón a partir de la denominada fórmula de masa empírica, propuesta esta por Carl F. Weizsäcker en 1935. Ahora bien, pese al éxito predictivo del MNGL a la hora de abordar el fenómeno de la unión nuclear, este no permite dar cuenta de la estabilidad inusualmente alta de los denominados números mágicos. Estos números (2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126) corresponden a la cantidad de nucleones —ya sean protones o neutrones— de un núcleo atómico con mayor estabilidad frente a la desintegración nuclear. En 1950, Goeppert-Mayer postuló un modelo matemático para la estructura de las capas nucleares que permitía dar cuenta de por qué ciertos números de nucleones en el núcleo atómico poseen una configuración particularmente estable: el Modelo Nuclear de Capas [MNC], que su artífice ilustra con una bella metáfora:

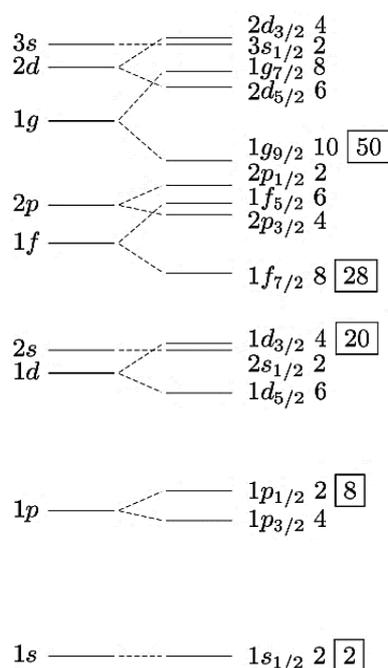
Piensen en una habitación llena de bailarines. Supongamos que rodean la sala en círculos, cada círculo circunscrito a otro. Luego, imaginen que en cada círculo pueden haber el doble de bailarines haciendo que un par vaya en el sentido de las agujas del reloj y otro par en sentido contrario. Ahora, agregad una variación más. Todos los bailarines giran dando vueltas y vueltas alrededor de la sala. Pero solo algunos de los que van en sentido contrario a las agujas del reloj giran en esa dirección. Los otros giran en el sentido de las agujas del reloj mientras que giran en sentido antihorario. Lo mismo es cierto para aquellos que bailan en el sentido de las agujas del reloj: algunos giran en el sentido de las agujas del reloj, mientras otros giran en sentido contrario⁶³ (Goeppert-Mayer, cit. Joan 1973, pág. 316).

En términos técnicos, todos los nucleones, salvo uno, están emparejados y las propiedades nucleares vienen determinadas por el nucleón desapareado. Por tanto, un número mágico describe los nucleones dentro del núcleo, así como los electrones circundantes, ocupando capas y subcapas, cada una de las cuales afecta solo a la otra levemente. Dado que los nucleones son fermiones, un núcleo atómico tiene las capas de menor energía llenas, por lo que los nucleones no pueden pasar a capas inferiores. Cada capa se intuye como un conjunto de estados cuánticos con energías similares y la diferencia de energía entre dos capas se obtiene a partir de las variaciones de energía dentro de cada capa. De hecho, la forma geométrica del espacio ocupado por un nucleón en un cierto estado de una capa interpenetra con el espacio ocupado por los nucleones de otras capas de un modo similar a como las capas de electrones se interpenetran en un átomo. Núcleos como

⁶³ La traducción es mía.

el del Helio (4), Oxígeno (16) y Calcio (40) son doblemente mágicos. Todos especialmente estables y más abundantes en el universo que otros núcleos de tamaño similar.

La idea de que los nucleones se agrupan en capas permite salvar la existencia de los denominados números mágicos. A diferencia del MNGL, el MNC no considera la interacción nucleón-nucleón, sino la interacción de un único nucleón con un potencial generado por el resto de nucleones. Considerando la interacción de un solo nucleón con un potencial medio que representa la ligadura nuclear: $\hat{H}\Psi = E\Psi$, y siendo $\hat{H} = -\hbar^2/2\mu + V$, se comprueba con potenciales con una solución conocida para la ecuación de Schrödinger y se comparan los resultados experimentalmente. Existe un potencial, el potencial de Saxon-Woods, al cual es posible agregar el término de interacción espín-órbita con ánimo de obtener una solución para la ecuación de Schrödinger con niveles de energía que permitan salvar todos los números mágicos. Este potencial viene dado por: $V(r) = -V_0/1 + e^{(r-R)/t}$, donde V_0 y t son parámetros, y $R = R_0A^{1/3}$ es el radio del núcleo, siendo A el número de la masa. El esquema de los niveles de energía que se obtiene es el siguiente:



En la distribución de niveles aparecen las capas completas que reproducen los números mágicos.

El análisis anterior revela la existencia de modelos microfísicos que, pese a la incompatibilidad que media entre sus postulados, permiten acometer por separado el estudio de diferentes fenómenos originados en ese nivel de realidad —mientras que el MNGL permite salvar la energía de unión de los nucleones, el MNC permite salvar los niveles de energía y la existencia de los denominados números mágicos—. A comienzos del siglo XX, la ausencia de una teoría unificada de la realidad atómica supuso la proliferación de modelos mutuamente incompatibles que, lejos de erigirse como fieles representaciones del núcleo atómico, pervivieron como idealizaciones destinadas a salvar fenómenos concretos, una conclusión que comparten Eisber y Resnick:

El modelo nuclear de capas se basa en la idea de que las partes constituyentes de un núcleo se mueven de forma independiente. El modelo de gota líquida implica todo lo contrario, ya que, en una gota de líquido incomprensible, el movimiento de cualquier parte constituyente se correlaciona con el movimiento de todas las partes vecinas. El conflicto entre estas ideas enfatiza que un modelo proporciona una descripción de solo un conjunto limitado de fenómenos, sin tener en cuenta la existencia de modelos contrarios utilizados para la descripción de otros conjuntos (Eisber & Resnick 1985, pág. 545).

5. CONCLUSIONES

A lo largo de la historia, los científicos se han servido de sistemas simplificados e idealizados que incorporan tan solo aquellas variables consideradas como relevantes para acometer el estudio de un fenómeno o conjunto limitado de fenómenos observados o intuitos en la física del mundo. Estos sistemas son los modelos, artificios teórico-matemáticos que, lejos de ofrecer una fiel cartografía de la física del

mundo, permiten salvar su apariencia a partir de un conjunto de hipótesis de partida y unas cuantas ecuaciones claramente formuladas. Entre el sistema simplificado —el modelo— y el sistema real —la física del mundo— «se establece una relación compleja, de sistema a sistema, donde algunas variables del sistema real pueden no aparecer en el modelo [...] y, a su vez, algunas variables del modelo pueden no poseer su correlato en el sistema» (Lombardi 1998, pág. 11). Solo cuando las variables asumen valor cuantitativo a partir de una medición puede establecerse una correspondencia biunívoca entre las variables presentes en el modelo y el mundo físico. En este caso, la determinación empírica de tales variables es condición necesaria, aunque no suficiente, para evaluar la fidelidad del modelo. Por esta razón, dado un fenómeno físico, resulta posible la existencia de una multiplicidad de modelos que faciliten su estudio a partir de diferentes idealizaciones del mismo y especulaciones sobre su comportamiento, un hecho recurrente en la historia de la ciencia. Cada modelo puede diferir cualitativamente del resto en la elección de aquellas variables consideradas como relevantes, ya que la elección de un modelo frente a otro responde en la mayoría de casos a un interés concreto y obedece en última instancia a los objetivos marcados por la propia investigación.

La cosmovisión mecanicista instaurada por el MMN, según la cual todos y cada uno de los fenómenos físicos podían describirse atendiendo a la materia y al movimiento, se encontraba íntimamente relacionada con la idea de que los fenómenos observados se pensaban causalmente determinados. Pero a comienzos del siglo XX, nuevos modelos comenzaron a plantear sus exigencias dadas las investigaciones derivadas del estudio de la electricidad y el electromagnetismo. La irrupción del MRE revirtió las nociones clásicas de espacio y tiempo, así como la naturaleza estrictamente causal de los fenómenos físicos. Según el MRE, la gravedad curva el espacio-tiempo, por lo que, siempre que exista un objeto físico, por ejemplo, una estrella o un planeta, el espacio que lo rodea se curvará según sea la masa del objeto. Como en el MRE el espacio es inseparable del tiempo, este último también se verá afectado por la presencia de materia. Ahora bien, la viabilidad del MRE a la hora de acometer predictivamente el estudio de ciertos fenómenos relativistas, como aquellos originados en campos gravitacionales intensos o en velocidades cercanas a la de la luz, no niega la efectividad del MMN cuando este último se aplica dentro de su dominio de aplicabilidad, por ejemplo, a la hora de calcular la masa de la Tierra, la densidad crítica del universo o el número de masas solares en la galaxia. Del mismo modo, al adentrarnos en el reino de la microfísica, los modelos destinados a estudiar el comportamiento de los fenómenos macrofísicos comienzan a presentar serias deficiencias predictivas, por lo que resulta necesario incorporar modelos nuevos que permitan acometer el estudio de fenómenos originados en ese nivel de realidad. En el caso del MNGL y el MNC, ambos se erigen sobre una imagen del núcleo atómico muy distinta; sin embargo, esta falta de correspondencia real entre la estructura teórico-matemática de ambos modelos y la estructura microfísica del núcleo atómico no niega la efectividad predictiva que ambos modelos asumen por separado, ya que mientras que el MNGL permite salvar la estabilidad de los nucleones y predecir su energía de unión, el MNC da cuenta de la existencia de los denominados números mágicos. Dada la incompatibilidad interteórica que media entre sus postulados fundamentales y el éxito predictivo de ambos por separado, resulta ilógico presuponer que ni del MNGL ni del MNC pueda inferirse una imagen fiable cómo es la realidad subatómica.

Es indudable que la ciencia ha conseguido configurar un conjunto de herramientas que permiten la abstracción y formalización de las regularidades y patrones de comportamiento observados en la física del mundo. Estas herramientas son los modelos, artificios teórico-matemáticos que hacen las veces de prolongaciones exosomáticas de nuestros sentidos brindándonos uno nuevo: el cálculo, mediante el cual sintetizamos cuantitativamente la realidad y acometemos predictivamente su estudio. Al adscribir su éxito a las categorías de viabilidad y ajuste funcional, y no a una presunta relación de semejanza, verosimilitud o isomorfismo, los modelos encuentran su justificación epistemológica en el constructivismo, donde lejos de brindar una imagen fiel de la realidad estudiada, facilitan la construcción de relaciones funcionales entre el mundo físico y su formulación matemática con ánimo de satisfacer una meta predictiva.

La historia de la ciencia es el acopio de esfuerzos conjuntos por formalizar teóricamente una visión matemática del mundo. La dimensión simbólica del lenguaje matemático ha facilitado esta formalización a partir de modelos que, pese a operar desde el plan simbólico, permiten ampliar las fronteras de nuestra experiencia sensible gracias a la viabilidad predictiva de sus postulados. La simbología matemática, materializada lingüísticamente en un conjunto de fórmulas y ecuaciones, permite tender un vínculo entre el lenguaje y la realidad, un vínculo en el que la intuición y la creatividad se valen de la analogía y la metáfora como estrategias lingüístico-cognitivas clave con las que configurar una imagen coherente del mundo que nos rodea, tal y como veremos a continuación.

CAPÍTULO III

ANALOGÍA Y METÁFORA EN CIENCIA

La metáfora es el silogismo analógico. El ser es uno y se define de muchas maneras.

ANTONIO ESCOHOTADO

En la vida, todo es una metáfora.

HARUKI MURAKAMI

1. INTRODUCCIÓN

La noble advertencia con la que comienza el *Tao* —«El Tao que puede encerrarse en palabras no es el verdadero Tao»— se revela como la primera referencia conocida que alude a la imposibilidad de capturar la realidad bajo ligaduras de palabras (Salas 2017). Este aforismo alcanza su máxima significación en el ámbito de la ciencia, donde el lenguaje se convierte en uno de los recursos más codiciados al permitir materializar lingüísticamente los descubrimientos y resultados de la investigación, así como reconfigurar nuestros juicios y aseveraciones sobre cómo es el mundo.

En la segunda mitad del siglo XIX, un grupo de lingüistas liderados por Friedrich Max Müller llevó a cabo una serie de traducciones al inglés de algunos tesoros místicos y literarios del Antiguo Oriente, entre los que se encontraban los *Vedas*, los *Upanishads* y el *Bhagavad-Gita*. El impacto revolucionario de estas traducciones permitió la apertura a un nuevo análisis semántico del mundo. En el caso de las *Analectas* o el *Tao Te Ching*, ambas obras encerraban lecciones filosóficas expresadas en un lenguaje radicalmente distinto respecto a la escritura occidental. Las funciones de los nombres, verbos, adjetivos y adverbios no mostraban una escisión clara, y se juzgaban según el contexto en el que se inscribían, un contexto donde la relación entre los constituyentes de la oración —el léxico— y sus aparentes reglas combinatorias —la sintaxis— cobraba especial importancia.

Aun con todo, y pese al enorme impacto que tuvieron estas traducciones en el terreno del análisis lingüístico, las generaciones posteriores desacreditaron las tesis de Müller por verse motivadas más por su interés personal hacia la cultura oriental que por su escepticismo académico. Pero con la llegada del siglo XX, el giro semántico iniciado por Müller recibió una grata acogida en los campos más diversos de la investigación académica gracias a los estudios de Lucien Lévy-Bruhl (1857 – 1939), Alfred Ernest Crawley (1869 – 1924), Bronislaw Malinowski (1884 – 1942) o Ernst Cassirer (1874 – 1945). Las investigaciones de Lévy-Bruhl en el terreno de la antropología sobre el esquema lingüístico y mental de los pueblos primitivos (Lévy-Bruhl 2012), las aportaciones de Crawley sobre la holofrase como rasgo inherente a las tribus y pueblos precivilizados, o los estudios de Malinowski acerca del valor funcional de la cultura (Malinowski 1981), entre otros muchos, merecen especial atención.

En 1923, Ernst Cassirer, en su obra *La filosofía de las formas simbólicas*, encarando el problema de la realidad a través del análisis categorial, desarrolla un riguroso estudio acerca de las interrelaciones entre «el arte y el lenguaje, el mito y el conocimiento» (Cassirer 1971, pág. 18). Las tesis dualistas cartesianas que abogaban por una escisión entre espíritu y materia —en su forma última, entre sujeto y objeto— perdieron fuerza ante un esquema tripartito en el que sujeto —*S*—, objeto —*O*— y lenguaje —*L*— desempeñaban roles irreductibles e intercausales en la configuración de lo que, a falta de un nombre mejor, denominamos realidad.

Así como el sonido aparece entre el objeto y el hombre, todo el lenguaje aparece entre este y la naturaleza que obra sobre él interna y externamente. El hombre se rodea de un mundo de sonidos para abarcar y confeccionar el mundo de los objetos [...] A través del lenguaje no se designa y expresa ni algo exclusivamente subjetivo ni exclusivamente objetivo, sino que en él aparece una nueva mediación (*Op. cit.*, pág. 34-35).

A partir de este momento, el signo fonético pasa a convertirse en el puente entre lo subjetivo y lo objetivo al permitir la relación entre ambos mundos.

El fonema es hablado y en esa medida es un sonido articulado y formado por nosotros mismos; y por la otra, en cuanto sonido escuchado, es una parte de la realidad sensible que nos rodea. De ahí que nosotros lo aprehendamos y conozcamos como algo “interno” y “externo” simultáneamente; como una energía de lo interno que se traduce y objetiva en algo externo (*Op. cit.*, pág. 18).

En ciencia, cuando se procede al estudio de un fenómeno natural, en primer lugar, se le atribuye *a priori* una presunta realidad sobre la que se proyecta una cierta actitud objetiva. Por ejemplo, el espín de un electrón parece ser lo que es de forma objetiva, independientemente de la actitud subjetiva que se tenga al respecto, así como del lenguaje utilizado para su descripción. Y, en cierto modo, es así. Una vez que el momento angular de una partícula ha sido formulado, la determinación del espín pasa a asumir un carácter puramente experimental y, por tanto, objetivo; no obstante, determinar el momento angular de un electrón, así como estudiar con modesta precisión el fenómeno, se hace posible gracias a un riguroso ejercicio de simplificación conceptual genuinamente creativo. Si a día de hoy es posible hablar en términos tan precisos como espín, momento angular o carga eléctrica, es gracias a la sofisticación de nuestro pensamiento primitivo debido a facultades como la experiencia subjetiva y el lenguaje. Es más, podría afirmarse que algo tan presumiblemente objetivo como el espín de un electrón debe su naturaleza a las experiencias compartidas —o verificaciones experimentales— de una comunidad científica (S_1, S_2, \dots), así como a los conceptos científicos (*L*) utilizados, cuyo papel, además de práctico, es lingüístico.

Pensamiento y lenguaje son inseparables y, en cierto modo, el segundo circunscribe el mundo interior, ampliando o restringiendo el campo de sus objetivos intelectuales. De forma análoga, a través del lenguaje de la teoría científica, nos llega la estructura oculta de los fenómenos naturales y con el progreso científico se amplían los dominios de la realidad material que describen las teorías y se ensanchan los horizontes de la ciencia. En este sentido, es conveniente analizar la actividad científica en su faceta de creadora del lenguaje más apropiado en cada caso, con el fin de estar en condiciones de mantener un diálogo eficaz con la naturaleza (Herrero 2016, pág. 42).

En cualquier caso, lo interesante de esta tríada epistemológica —*S, O, L*— es el valor instrumental del lenguaje a la hora de conjeturar sobre la propia realidad, limitando el tipo de preguntas que *S* puede formular, así como el tipo de realidad que *S* es capaz de comprender y los modos en que puede hacerlo. En ocasiones, puede darse el caso de que *S* se vuelva plural y, como resultado, aparezcan ambigüedades y problemas de eficacia comunicativa en *L*. Para evitar esto, en el discurso científico se emplean una serie de significados que Wheelwright bautiza con el término de estenosignificados; es decir, «significados que pueden ser compartidos exactamente del mismo modo por un gran número de personas; en general, por todas cuantas utilizan el mismo lenguaje o un mismo grupo de lenguajes susceptibles de traducción mutua» (Wheelwright 1979, pág. 34). Estos estenosignificados, entendidos como definiciones que permiten conectar los datos capturados por la observación al plano simbólico, remiten a experiencias definibles, ya sean estas reales o abstractas, e identificables, y su acuñación debe ser consensuada y aprobada de forma unánime por todos los miembros de la comunidad científica. Así surgen, por ejemplo, las definiciones de las magnitudes: fuerza, velocidad, energía o momento. La génesis de estas magnitudes reside en la observación, pero su naturaleza es diferente, ya que estas responden a construcciones mentales que, aunque de origen sensible, una vez definidas, encierran un significado conceptual que permite sintetizar nociones complejas, facilitando así la formulación matemática del comportamiento del fenómeno en el que están involucradas.

Podría decirse que, a diferencia del discurso cotidiano, los términos empleados en el discurso científico abrazan una mayor precisión semántica, así como un mayor campo de significación. En mecánica, por ejemplo, la noción de masa nace como un estenosignificado originado a partir de observaciones concretas. Las propiedades mensurables, como la masa, se incorporan al discurso científico con la finalidad de estudiar operaciones mecánicas a partir de características observables. Esto no significa que el concepto de masa se identifique con las impresiones sensoriales percibidas. Si bien la ciencia tiene como objeto de estudio la realidad física, esta profundiza, va más allá, construyendo nuevas entidades abstractas que quedan fuera de la observación, pero que tienen su origen en las propiedades últimas de la materia. Como ejemplo de ello, podemos traer a colación el fenómeno y, a su vez, concepto de intensidad de corriente eléctrica. Los efectos de la intensidad de corriente eléctrica no pueden captarse por los sentidos, de ahí que su definición precise una serie de verificaciones experimentales previas a la puesta en práctica de un conjunto de principios teóricos refrendados empíricamente a partir del estudio de la electricidad. Asimismo, a medida que la investigación penetra cada vez más en el estudio de las propiedades últimas de la materia, poco a poco el lenguaje científico se independiza, tornándose contraintuitivo y, en buena medida, incomprensible. En palabras de Heisenberg:

Al adentrarse en terrenos de la naturaleza que ya no son asequibles a nuestros sentidos, ha empezado a fallarnos también el lenguaje, cuyos conceptos quedan convertidos en herramientas embotadas que no podemos utilizar con soltura, que no pueden calar en los nuevos terrenos del conocimiento (Heisenberg 1974, pág. 110).

En este tercer y último capítulo examinaré el papel que la analogía y la metáfora asumen en nuestro modo de interpretar y representar la realidad, sobre todo en lo que respecta a su importancia como estrategias lingüístico-cognitivas durante la fase de modelización. La apuesta de que la ciencia responde a una extensión de nuestra apertura cognitiva al mundo, rompe con toda propuesta que sitúe la analogía y la metáfora como extralimitaciones en la rigurosa articulación del discurso científico. La plasticidad de ambas estrategias se asienta en facultades cognitivas previas a la emergencia del lenguaje natural humano, como el reconocimiento de patrones, por lo que su inclusión dentro de todo programa de investigación precisa una reconsideración acerca de su naturaleza como estrategias tropológicas responsables de nuestro modo de conjeturar hipótesis y formular modelos y teorías con las que acometer el estudio de la física de la realidad.

2. ANALOGÍAS, METÁFORAS Y MODELOS EN CIENCIA

El cero es la mayor metáfora. El infinito la mayor analogía. La existencia el mayor símbolo.

FERNANDO PESSOA

Cuando a Isaac Asimov le preguntaron qué ocurriría si una fuerza irresistible chocara contra un cuerpo inamovible, él respondió:

He aquí un rompecabezas clásico sobre el que han debido verter su palabrería millones y millones de argumentos. Pero antes de dar mi solución pongamos algunas cosas en claro. El juego de explorar el universo mediante técnicas racionales hay que jugarlo, como todos los juegos, de acuerdo con ciertas reglas. Si dos personas quieren conversar inteligentemente tienen que ponerse de acuerdo acerca del significado de los símbolos que utilizan (palabras o cualesquiera otros) y sus comentarios han de tener sentido en función de ese significado (Asimov 1991, pág. 18).

Al igual que Asimov, considero conveniente comenzar ofreciendo una definición precisa de cada uno de los términos empleados de aquí en adelante, a saber: analogía, metáfora y modelo. El amplio abanico de acepciones que asumen cada uno de estos tres vocablos por parte de innumerables autores ha sido objeto de profundo debate, por lo que un examen en profundidad acerca de la naturaleza terminológica, así como de su posible repercusión en los distintos ámbitos de la filosofía científica, requeriría un tratado aparte. Por tanto, en lo que respecta a su significación, me centraré en proveer únicamente una definición rigurosa que delimite semántica y conceptualmente cada uno de estos términos dentro del marco epistemológico que introduce el constructivismo como filosofía de la ciencia.

Comencemos por la noción de analogía. Cuando se busca expresar una significación, existe la posibilidad de exponer esta a través de una designación que solo tiene con lo designado una relación arbitraria, aunque compartida y reconocida por todos los miembros de una misma comunidad. Entre el nombre en sí y su significado no existe ninguna relación empírica, sino tan solo el convenio tácito de que esta secuencia de grafemas ligados a una serie de sonidos articulados adquiere un significado preciso y compartido por todos los miembros de un mismo gremio. Lo mismo ocurre cuando consideramos una ecuación matemática. Al igual que cualquier término o expresión, una ecuación matemática está constituida por una concatenación de símbolos formalizados sujetos a una codificación conceptual, una semántica, así como operacional y relacional según procedimientos combinatorios, una sintaxis. Ahora bien, además de la semántica y la sintaxis, existe una tercera modalidad lingüística, una modalidad que nos permite emplear signos en función de su aparente relación sensible con su respectivo significado: la analogía.

En 1989, Roger Penrose, en su obra *La nueva mente del emperador*, aborda el problema mente-cerebro con uno de los ataques más implacables contra la hipótesis fuerte de la inteligencia artificial (Penrose 2011). A diferencia de la mente humana, Penrose considera que las máquinas trabajan mediante algoritmos, por lo que resulta imposible que ninguna máquina llegue nunca a ser inteligente. Pero, ¿qué significa eso? Al fin y al cabo, un algoritmo no es más que una sucesión de operaciones elementales y sistemáticas que permiten hacer un cálculo y hallar la solución para un tipo de problema determinado. Lo realmente importante aquí es la descomposición del trabajo en tareas más elementales y su realización sucesiva en un orden prefijado, de modo que, si se omitiera alguna o se alterara el orden, el algoritmo no funcionaría. Según Penrose, en el cerebro operan leyes de naturaleza no algorítmica que aún están por descubrir, razón por la que este nunca podrá ser emulado a la perfección por una máquina que funcione sobre los principios computacionales actuales. El razonamiento analógico parece responder a alguna de estas leyes, ya que, al no ser posible su descomposición en una serie de reglas prefijadas, por muy complejas que estas sean, aun siendo posible la construcción de sistemas que cumplan con éxito dichas tareas, la construcción de una máquina inteligente que opere analógicamente, tal y como sugiere Penrose, no resulta tarea fácil.

El pensamiento, por su parte, entendido este como una serie de sucesiones lineales de cadenas de inferencias lógicas, excluye importantes inferencias de otra naturaleza dominadas por la analogía. Consideremos, por un lado, la demostración de un teorema matemático y, por otro, la contemplación de una obra de arte, por ejemplo, *Retrato de Dora Maar* de Pablo Picasso. Es evidente que esta última encierra un tipo de conocimiento que no puede reducirse a una serie de encadenamientos lógicos sin perder parte de su significado. ¿Alguien podría decir que es capaz de descomponer *El sueño de la razón* de Goya o *La Victoria de Samotracia* en un conjunto de algoritmos e inferencias lógicas? ¿Sería posible hacer lo mismo con *Stabat Mater* de Pergolesi o con *Marooned* de Pink Floyd?

¿Qué es entonces una analogía? Una analogía es una correspondencia parcial de identidad entre dos dominios de experiencia. En 1911, Rutherford dio a conocer por vez primera su modelo atómico en el

que presentaba una serie de partículas —electrones— orbitando en torno a un punto de masa central —núcleo—. La complejidad de este modelo residía en que este buscaba dar cuenta de una realidad que quedaba fuera de toda posible observación. Para ello, Rutherford incorporó en su modelo un doble criterio de identidad entre el átomo y el sistema solar a partir de la siguiente metáfora: *Un átomo es un sistema solar en miniatura*⁶⁴. Haciendo uso de la terminología de Lakoff y Johnson (2017), el átomo correspondería al dominio meta (*target domain*) mientras que el sistema solar correspondería al dominio fuente (*source domain*), siendo este último el que permite la inferencia del primero a partir de una serie de correspondencias parciales de identidad, es decir, de analogías, proyectadas entre ambos dominios. El modelo atómico de Rutherford permite capturar bajo nodos de redes analógicas una minuciosa selección deliberadamente escogida de rasgos asociados entre el sistema solar y el átomo, configurando así un patrón de referencia para su posterior estudio. Es evidente que la realidad subatómica no obedece fielmente a la imagen de la que disponemos de nuestro sistema solar, por lo que la metáfora no aporta ninguna comprensión acerca de la naturaleza del átomo; sin embargo, el basamento analógico sobre el que esta se construye permite dotar de estructura inferencial el átomo conforme a una perspectiva: una serie de entidades orbitando (electrones y planetas) en torno a un punto de masa central (núcleo y Sol). Estas correspondencias parciales de identidad son lo que, en lo sucesivo, denominaré analogías.

¿Y una metáfora? Una metáfora es una estrategia lingüístico-cognitiva que permite poner en interacción diferentes dominios de experiencia partir de una serie de correlaciones parciales de identidad, o analogías. Como estrategia inherente al pensamiento y la comunicación, la metáfora funciona como la piedra angular en la configuración de modelos en ciencia, facilitando el estudio de realidades nuevas gracias a la apertura creativa del científico y al poder evocativo del lenguaje. Como testimonio ilustrativo de ello, tomemos como ejemplo el modelo hidrodinámico del que se valió Maxwell para desarrollar su teoría del campo electromagnético. Maxwell utilizó una estructura mecánica conocida como analogía para trasladar los principios mecánicos a los fenómenos electromagnéticos, cuya naturaleza era hasta la fecha desconocida. Esto le permitió no solo inferir de algún modo el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos, sino también valerse de definiciones y teoremas conocidos de la mecánica para predecir y estudiar las propiedades de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Podría decirse que la aproximación de Maxwell al estudio del electromagnetismo se basa en una transferencia de significados entre el dominio de la mecánica de fluidos y el dominio del electromagnetismo, una transferencia en la que se percibe una correspondencia analógica de origen mecánico en los términos que describen el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos, como el fluido electromagnético, las líneas de corriente o la resistencia.

¿Y un modelo? Un modelo es un artificio matemático diseñado el cálculo y la predicción. Los modelos funcionan como conjuntos de hipótesis que permiten inferir las propiedades y patrones de comportamiento de un fenómeno o conjunto limitados de fenómenos originados en la física del mundo, razón por la que se presentan como una fuente de incalculable valor en la investigación al permitir obtener información acerca de lo que se sitúa más allá de la experiencia inmediata, bien sea por la distancia que estos puedan presentar con respecto a nosotros (agujero negro, galaxia, quásar, etc.), por la dificultad que entraña su detección y experimentación (átomo, electrón, quark, etc.) o por inscribir su naturaleza dentro de una dimensión teórica o especulativa (cuerdas, flujo oscuro, fotino, taquión, etc.). A partir de un ejercicio de síntesis y aproximación intuitiva, los modelos permiten dotar de estructura inferencial nuevos dominios de conocimiento que en su plena complejidad se mostrarían opacos a nuestra comprensión sensibles e inaccesibles a nuestra manipulación intelectual.

En cualquier caso, esta demarcación semántica entre estas tres nociones —analogía, metáfora y modelo— no es aceptada de forma unánime. En su obra *Modelos y metáforas*, Black (1966) sostiene que el uso de modelos se asemeja al de metáforas al requerir la transferencia analógica de un vocabulario. Por su parte, Gentner y Jeziorsky (1993) consideran que la analogía responde a un tipo de metáfora que funciona como una correspondencia de conocimiento; Harré, Aronson y Way (2000) que obedece a una propiedad central en todas las relaciones de modelización; Bartha (2010), Holyoak y Thagard (1995) y Rivadulla (2006, 2011) que toda proyección analógica, en caso de haberla, exige de una configuración mental previa de los modelos involucrados en dicha proyección; y Bustos (2000, 2013) que la metáfora permite dotar de alcance inferencial un dominio desconocido sin darse siquiera correspondencias analógicas previas. Sin ser lo mismo, analogías, metáforas y modelos imponen categorías al mundo a partir de las cuales percibimos lo que, en ocasiones, nos resulta incognoscible. Aun con todo, considero importante matizar que la principal diferencia que media entre la noción de analogía y la de metáfora es que la primera responde a una correspondencia parcial de identidad entre dos dominios de experiencia, mientras que en la segunda

⁶⁴ Años después de que Rutherford diera a conocer su tan controvertida metáfora atómica, Niels Bohr destacó el carácter simbólico de esta aludiendo que la trayectoria orbital de los electrones en torno al núcleo no reflejaba una realidad, sino que únicamente se servía del modelo planetario para proyectar una serie de correspondencias analógicas que servían de referencia orientativa en el estudio de la disposición de la materia subatómica.

predomina la apertura significativa del observador —del científico—, así como su capacidad creativa para extender su propia percepción de cómo es el mundo.

3. ANALOGÍA

La imagen de un científico frente a una pizarra repleta de símbolos y fórmulas matemáticas indescifrables sugiere la idea de que el trabajo de, pongamos por caso, todo físico teórico consiste en manipular una serie de ecuaciones y fórmulas precisas —la del campo magnético, la del momento angular o la de la masa del electrón— de acuerdo con las leyes que gobiernan el reino de la matemática. Sin embargo, pese a ser esta la imagen generalizada, al reconstruir el periplo intelectual que ha conducido a algunos de los más brillantes científicos en la historia a sus mayores descubrimientos, puede apreciarse el rol central que la analogía ha desempeñado, en primer lugar, en la captura de regularidades y paralelismos en la física de la realidad y, en segundo lugar, en la intuición de nuevos aspectos de la realidad inaprensibles por los sentidos.

La noción de analogía tiene su origen en el ámbito de la matemática, donde esta adquiere el significado de proporción o igualdad. Aristóteles se valió de esta idea para extender su significado al discurso filosófico y afirmar que «todas las cosas se corresponden entre sí y tienen unidad analógica, [ya que] lo análogo se da en todas las categorías de lo que es» (Aristóteles 1994, pág. 579). En el terreno de la investigación científica, la analogía permite la inferencia de un dominio desconocido a partir de las propiedades y regularidades observadas en otro dominio previamente conocido. Un ejemplo ilustrativo de ello sería el modelo cinético de los gases, el cual es a las leyes de la mecánica lo que el modelo termodinámico a las leyes de la termodinámica. La correspondencia analógica entre ambos modelos es lo que permite identificar la temperatura termodinámica de un cuerpo con la energía cinética de traslación de las moléculas en un gas.

A continuación, examinaré la importancia de la analogía en ciencia, concretamente en el dominio de la física, donde esta estrategia ha contribuido notablemente en la elaboración de hipótesis y la configuración de modelos que, una vez formalizados teóricamente y constatados empíricamente, han permitido expandir las fronteras de nuestro conocimiento científico gracias a la redefinición de conceptos heredados como masa, energía o momento.

3.1. La analogía en la radiación del cuerpo negro

La analogía comenzó a revelarse como una estrategia de pensamiento inherente a la actividad científica a comienzos del siglo XX, cuando Einstein advirtió de una relación entre el comportamiento de un cuerpo negro y un sistema distinto que poseyera también un espectro determinado por su temperatura, por ejemplo, un gas ideal encerrado en el interior de un recipiente. A raíz de los trabajos realizados por Ludwig Boltzmann y James Clerk Maxwell sobre la posibilidad de que los gases estuvieran compuestos por partículas corpusculares últimas que interactuaban entre sí, Einstein intuye una profunda relación entre un cuerpo negro y un gas ideal, una correspondencia matemática que ligaba el fenómeno de la distribución de energía en ambos dominios: por un lado, la fórmula ideada por el físico alemán Wilhelm Wien para el espectro de cuerpo negro y, por otro, la fórmula de Maxwell-Boltzmann para el espectro del gas. A partir de aquí, Einstein decide extender esta relación entre un cuerpo negro y un gas ideal a cualquier otro sistema físico, por ejemplo, un líquido que contuviera partículas coloidales cuyo incesante movimiento pudiera observarse a partir de un microscopio. Sobre esta analogía, postula lo que a día de hoy se conoce como movimiento browniano, un nuevo concepto con el que buscaba adecuar la fórmula de la entropía en ambos dominios.

La fórmula $E/h\nu$ para el espectro de cuerpo negro, en la que h es la constante de Planck y ν la frecuencia de las ondas electromagnéticas, supone dividir la energía total E en cuantos de luz, cada uno de ellos poseedor de una energía $h\nu$. Esta proporción indica de cuántos cuantos está compuesto el conjunto mayor. Dado que las unidades se cancelan —ya que hay tantos *ergs* en el numerador como en el denominador—, este se trata de un número puro, pues su valor es independiente del sistema de unidades que se emplee. Esta división de E en pequeños cuantos, todos con un tamaño $h\nu$, permitió a Einstein deducir que la radiación en la cavidad de un cuerpo negro se componía de pequeños corpúsculos, paquetes de energía análogos a las N moléculas de un gas ideal, cada uno con una cantidad mínima $h\nu$ de energía, asociada esta con la frecuencia ν .

3.2. La analogía en el efecto fotoeléctrico

Tras postular la existencia de cuantos de luz —hoy día conocidos como fotones—, Einstein decide someter sus ideas a resolución experimental. Esto le lleva a estudiar el llamado efecto fotoeléctrico, un fenómeno descubierto y descrito por el físico alemán Heinrich Hertz en 1887. La formulación matemática de este fenómeno permitía predecir en una sola ecuación la eyección de electrones de un metal como una función de la longitud de onda de la luz incidente, algo que contradecía frontalmente la presunta universalidad de las ecuaciones de Maxwell. El punto de inflexión llegó en 1923, cuando Arthur Holly Compton sorprendió al mundo al mostrar que cuando una onda electromagnética se aproxima a una partícula cargada eléctricamente, por ejemplo, un electrón, transfiere a esta última parte de su energía cinética y momento, pero no de la manera predicha por las ecuaciones de Maxwell. A raíz de este descubrimiento, la analogía cuántica —de cuantos de energía— de Einstein revolucionó el campo de la física al dotar experimentalmente de estructura corpuscular la luz.

3.3. La analogía en relatividad

En su obra *La analogía*, Douglas Hofstadter y Emmanuel Sander examinan con alto grado detalle el razonamiento analógico que Einstein siguió en la formulación de su teoría de la relatividad (Hofstadter & Sanders (2018, págs. 661 y ss.)). Al incorporar en el principio de relatividad galileana un desplazamiento analógico en horizontal, el físico alemán buscó demostrar que los postulados de Galileo no solo se mostraban predictivamente exitosos en el dominio de la mecánica, sino también en el del electromagnetismo. Según Galileo,

pedra [al lanzarla desde lo alto de un mástil] cae siempre en el mismo lugar de la nave, tanto si está quieta como si se mueve con cualquier velocidad. Por lo que, por ser la misma la argumentación referente a la Tierra que a la nave, del hecho de que la piedra caiga siempre perpendicularmente al pie de la torre no se puede inferir nada sobre el movimiento o reposo de la Tierra (Galileo 1632, pág. 25).

En términos técnicos, el principio de relatividad galileana afirma que dados dos marcos de referencia moviéndose a una velocidad relativa constante, no existe experimento mecánico alguno que pueda distinguir uno de otro. Es precisamente aquí donde Einstein decide extender el alcance del principio de relatividad galileana, limitado a los fenómenos mecánicos, a todo el conjunto de fenómenos ópticos y electromagnéticos. En palabras del propio Einstein: «Que un principio de una generalidad tan amplia se mantenga con tanta exactitud en un dominio de fenómenos, y que no sea válido para otros, no es a priori muy probable⁶⁵» (Einstein 2014, pág. 15-16). Este desplazamiento analógico llevó a Einstein a un entramado de ideas hasta entonces desconocidas, como la posible dilatación del tiempo, la contracción de los objetos en movimiento o la paradoja de los gemelos.

En un artículo publicado en 1905, Einstein postula que cualquier objeto que emite energía en forma de luz, por ejemplo, una linterna, pierde una pequeña cantidad de su masa. Dado que un haz de luz posee una cierta cantidad de energía, y dado que la energía se conserva en todos los procesos físicos (mecánicos, electromagnéticos, etc.), el objeto emisor, en este caso, la linterna, debería perder indefectiblemente parte de la energía. En términos técnicos, todo proceso de radiación de energía E involucra una pérdida de masa igual a E/c^2 , por lo que todo objeto que absorba una cantidad E de energía debe ganar una cantidad de masa equivalente a E/c^2 . Ante tal incógnita, Einstein decide distinguir dos tipos de masa. Por un lado, la masa clásica m_c , ligada a la noción tradicional de masa, y, por otro, una nueva y contraintuitiva noción de masa derivada de la ecuación $E = mc^2$, m_e . Dada su decidida búsqueda de la uniformidad y simplicidad de las leyes de la física, Einstein se predispone a reestablecer la unidad conceptual entre los dos tipos de masa: m_c y m_e . Para ello, se cuestiona la posibilidad de que cualquier objeto físico, ya sea este un electrón o un planeta, pueda desvanecerse en forma de m_e , concentrada esta en los rayos de luz en fuga. Esta hipótesis no solo sugería que los objetos físicos pudieran llegar a desmaterializarse —o, si imaginamos el escenario a la inversa, materializarse de forma espontánea—, sino que en el proceso se desprendería una simultánea cantidad de energía. La aparente volatilidad de este nuevo tipo de masa m_e llevó a Einstein a considerar la posibilidad que, al igual que ocurre con la energía dado su principio de conservación, la m_e pareciera poder transformarse y cambiar de forma sin necesidad de aumentar o disminuir. Esta relación entre la ley de conservación de la energía y esta presunta conservación de la m_e , empujó a Einstein a establecer analogía entre ambas nociones, a partir de la cual la m_c debía, al igual que la m_e , poseer energía, tal y como describía la ecuación $E = mc^2$. Es más, dada la constante multiplicativa c^2 , la más mínima transformación

⁶⁵ La traducción es mía.

de m_c en m_e implicaría que una cantidad inimaginable de energía pudiera materializarse, al parecer, de la nada.

Poco después de que Einstein publicara sus trabajos teóricos, el físico de origen inglés Paul Dirac introdujo por primera vez, en 1928, el término antipartícula. Años más tarde, se observaría la primera desfragmentación producida por la colisión de dos fragmentos de materia, un electrón y un positrón, en un proceso que dio origen a dos fotones que se alejaban entre sí a la velocidad de la luz. Ambos fotones ondulaban con una cantidad de energía electromagnética que, al ser dividida por c^2 , correspondía a la suma de la m_e del electrón y del positrón. Este descubrimiento reveló que la materia ordinaria podía desaparecer súbitamente y transformarse en un estallido de energía de radiación que poseyera exactamente la misma cantidad de m_e , confirmando bajo verificación experimental la analogía de Einstein que ligaba materia y energía, formulada en su famosa ecuación $E = mc^2$.

El siguiente paso en el periplo analógico de Einstein, fue ampliar los principios de su, por aquel entonces, teoría especial de la relatividad al estudio de sistemas sujetos a un movimiento acelerado. Apoyado en los trabajos de Ernst Mach, Einstein rechaza el concepto de movimiento absoluto de Newton y comienza a incorporar marcos de referencia acelerados en su versión especial de la relatividad para así mostrar que la aceleración, al igual que la velocidad, no es absoluta, sino que depende del marco de referencia escogido. Para ello, recupera el concepto de fuerza ficticia, la cual comparte una propiedad matemática especial: si dicha fuerza actúa sobre un objeto con masa m , entonces esta será proporcional a m sin importar el marco de referencia que se adopte para realizar la medición ni el movimiento propio del objeto. A partir de este concepto, Einstein se propone ampliar su teoría especial de la realidad al estudio de la gravedad. Como punto de partida, considera la analogía que liga la fórmula de gravitación con la de la fuerza eléctrica entre dos partículas con carga, salvo por una sutil diferencia: la gravedad es atractiva, mientras que la electricidad puede ser atractiva o repulsiva, dependiendo de las cargas. En el caso de la gravedad, la fuerza de atracción que media entre dos objetos inmóviles de masa m y M separados por una distancia d viene dada por la famosa ecuación de Newton:

$$F = -G \frac{mM}{d^2}$$

En lo que respecta a la electricidad, la fuerza entre dos objetos inmóviles con carga q y Q , y separados por una distancia d , se expresa con la conocida ley de Coulomb:

$$F = k \frac{qQ}{d^2}$$

Como puede comprobarse, las dos ecuaciones son formalmente análogas, solo que en la segunda las cargas sustituyen a las masas.

Considerando la analogía que liga la masa y la energía, y dada la equivalencia entre un marco de referencia sujeto a movimiento constante y uniforme, como el de un cuerpo inmerso en un campo gravitatorio, y un marco de referencia acelerado, Einstein llega a la conclusión de que el haz de luz que emite un cuerpo sumido en un marco de referencia en rotación también ha de seguir una curvatura. Siguiendo los estudios de Einstein, en 1919, durante el transcurso de un eclipse solar, Sir Arthur Eddington logró confirmar la curvatura de los haces de luz procedentes de una estrella distante a causa del campo gravitatorio del Sol. Ante la corroboración experimental de Eddington, Einstein se vio alentado a resolver la paradoja de Ehrenfest⁶⁶. Para ello, recurre a los estudios desarrollados por Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann y Nikolái Lobachevski, entre otros, durante el siglo XIX sobre geometrías no euclídeas, un tipo de geometría donde la razón entre la circunferencia de un círculo y su diámetro puede diferir arbitrariamente de π . Al hacerlo, se da cuenta de la importancia de incorporar las fórmulas geométricas de los teoremas bidimensionales de la geometría de Gauss y adaptarlos a un espacio de Minkowski, provisto este de tres dimensiones espaciales y una temporal. Esta idea le lleva a considerar un espacio curvo de cuatro dimensiones donde el concepto de curvatura no solo se limita al espacio, sino que se extiende también a la dimensión del tiempo. En palabras de Einstein:

La transformación de Lorentz generalizada puede caracterizarse de un modo aún más sencillo si en lugar de t se introduce como variable temporal la variable imaginaria $\sqrt{-1}ct$. Si de acuerdo a esto ponemos $x_1 = x$; $x_2 = y$; $x_3 = z$; $x_4 = \sqrt{-1}ct$. Y análogamente para el sistema con primas K' , entonces la condición que satisface idénticamente la transformación será: $x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 + x_4'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$. [De aquí] se desprende que la coordenada temporal imaginaria x_4 entra en la condición de transformación en pie de igualdad con las coordenadas espaciales x_1, x_2, x_3 . A eso responde el que, según la teoría de la relatividad,

⁶⁶ Véase Anexo III.

el “tiempo” x_4 intervenga en las leyes de la naturaleza en la misma forma que las coordenadas espaciales x_1, x_2, x_3 .

Minkowski llamó “universo” o “mundo” al continuo cuatridimensional descrito por las “coordenadas” x_1, x_2, x_3, x_4 , y “punto del universo” o “punto del mundo” al suceso puntual. La física deja de ser un suceder en el espacio tridimensional para convertirse en cierto modo en un ser en el “mundo” cuatridimensional. Este “mundo” cuatridimensional guarda un profundo parecido con el “espacio” tridimensional de la geometría analítica (euclídea). Pues si en este último se introduce un nuevo sistema de coordenadas cartesianas (x'_1, x'_2, x'_3) con el mismo origen, entonces x'_1, x'_2, x'_3 son funciones homogéneas y lineales de x_1, x_2, x_3 que cumplen idénticamente la ecuación $x'^2_1 + x'^2_2 + x'^2_3 = x^2_1 + x^2_2 + x^2_3$. La analogía se completa. El mundo de Minkowski cabe contemplarlo formalmente como un espacio euclídeo cuatridimensional (con coordenada temporal imaginaria); la transformación de Lorentz se corresponde con una “rotación” del sistema de coordenadas en el “universo” cuatridimensional (Einstein 2012, págs. 104-105).

El fecundo campo de analogías sobre el que Einstein construye su teoría de la relatividad —la analogía entre un campo gravitatorio y un marco de referencia acelerado, entre las leyes de la mecánica y las leyes de la física en su conjunto, o entre marcos de referencia en rotación y geometrías bidimensionales no euclídeas— le proporcionaron las herramientas matemáticas necesarias para redefinir las nociones heredadas de masa, energía, espacio y tiempo, e instaurar una nueva teoría de la gravitación descrita en términos geométricos que cambiaría para siempre nuestra imagen del mundo.

4. METÁFORA

Tengo dos superhéroes. Uno es la metáfora y el otro la combinatoria. Cuando juntamos el poder de las metáforas con la naturaleza combinatoria del lenguaje y el pensamiento, somos capaces de crear un número prácticamente infinito de ideas, incluso aunque estemos equipados con un inventario finito de conceptos y relaciones.

STEVEN PINKER

El poder creativo de la metáfora reside en su naturaleza bidimensional, tanto epifórica como diafórica. La dimensión epifórica (del griego *ἐπιφορά*, *epiphorá*) permite la transferencia del significado de un dominio a otro. Paul Henle reformula la propuesta aristotélica en un sentido en que, sin constituir expresamente una teoría predicativa de la metáfora, desvincula esta del terreno de la denominación y la conecta con el terreno de la predicación: «Un signo es metafórico cuando es utilizado con referencia a un objeto al que no denota literalmente, pero que tiene ciertas propiedades comunes con lo literalmente denotado⁶⁷» (Henle 1958, pág. 83). Este desplazamiento del significado se ve complementado al mismo tiempo por su dimensión diafórica (del griego *διαφορά*, *diaphorá*), ligada a la capacidad de la metáfora para ampliar el alcance significativo del lenguaje mediante mecanismos como la yuxtaposición y la simplificación. Si nos remontamos al origen de nuestro universo, antes incluso de que se unieran los primeros átomos de hidrógeno y oxígeno, hubo un momento en que el agua se originó por la unión de estos dos elementos bajo unas condiciones idóneas de temperatura y presión. Lo mismo ocurre en el lenguaje. En la esfera de los significados, la yuxtaposición de palabras e imágenes antes separadas puede generar nuevas sugerencias semánticas. Tomemos como ejemplo el término *ikigai* (del japonés 生き甲斐), el cual puede traducirse como “razón de ser”. Este se compone a su vez de dos elementos: 生き “vida” y 甲斐 “valer la pena”, donde 甲斐 puede a su vez descomponerse en 甲 “armadura” y 斐 “hermoso”, significados aparentemente independientes pero que, gracias a su combinatoria, extienden su alcance semántico.

La idea de que la metáfora introduce un cambio lingüístico en la denominación dio paso a un sinfín de propuestas acerca de si su naturaleza bidimensional —epifórica y diafórica— la convierte en una estrategia fiable con la que interpretar la realidad. Entre las muchas de estas propuestas, vale la pena destacar la expuesta por Koestler a partir de su concepto de bisociación, el cual alude a la intersección de dos planos asociativos o universos del discurso que se perciben como separados y, en ocasiones, independientes.

La repentina bisociación de un evento mental con dos matrices habitualmente incompatibles resulta en una transferencia abrupta del tren de pensamiento de un contexto asociativo a otro [...] Esta bisociación de la

⁶⁷ La traducción es mía.

experiencia subjetiva con un marco de referencia objetivo es quizá el descubrimiento más ingenioso del Homo sapiens⁶⁸ (Koestler 1964, pág. 59-63).

La metáfora permite capturar la convergencia de ambos universos dando como resultado un cambio en el significado que no ofrece solo un giro de perspectiva, sino que además trae consigo una reorganización de los contenidos empíricos asociados. Adoptando el concepto de bisociación acuñado por Koestler, y asumiendo que la metáfora aparece cuando existe una interacción entre dos significados sobre los que se proyecta cierto grado de asociación, resulta incuestionable situar esta última como una estrategia inherente a la actividad científica, y más concretamente a la fase de modelización, dada su idoneidad para capturar paralelismos y regularidades procedentes de nuestra experiencia del mundo y configurar nuevos esquemas de conocimiento. Es más, es precisamente aquí, en la fase de modelización, donde la metáfora cobra especial importancia al permitir proyectar a lo ignoto la experiencia de lo ya conocido, facilitando la estructura inferencial de un nuevo dominio y revelando, al mismo tiempo, la homogeneidad oculta de la realidad. Por esta razón, la metáfora precisa de una seria reconsideración acerca de su naturaleza epistémica, así como un riguroso examen de la importancia de su inclusión dentro de cualquier programa de investigación que defienda el privilegio epistemológico de la ciencia moderna.

4.1. Valores epistémicos de la metáfora científica

El creciente interés que ha suscitado la metáfora en el ámbito de la ciencia, ha llevado a muchos autores a reflexionar sobre su valor epistémico. Según la herencia tradicional, la metáfora ha sido considerada patrimonio casi exclusivo del lenguaje literario; no obstante, su naturaleza cognitiva le otorga un espacio de creciente interés en el terreno de la epistemología, ya que su revalorización en el discurso científico no responde a criterios puramente retóricos, sino a su capacidad para dotar de estructura inferencial realidades nuevas a través del lenguaje.

A continuación, analizaré el valor epistémico de la metáfora en la investigación científica. La premisa de partida en torno a la cual se desarrollan los subsiguientes apartados parte de la premisa de que todo lenguaje, incluido el lenguaje matemático, es, en esencia, tropológico, convirtiendo la metáfora en el principal motor de su actividad lingüística, así como de su naturaleza simbólica⁶⁹.

4.1.1. El valor heurístico de la metáfora

La metáfora nos sirve para hacer prácticamente asequible lo que se vislumbra en el confín de nuestra capacidad. Sin ella, habría en nuestro horizonte mental una zona brava desconocida e indómita.

ORTEGA Y GASSET, *Las dos grandes metáforas*

El valor heurístico (del griego εὐρίσκειν, “hallar, inventar”) de la metáfora se encuentra vinculado con su faceta creativa. Según la ortodoxia científica, el discurso científico ha de ser unívoco, carente de ambigüedad, por lo que el uso de metáforas se ha considerado tradicionalmente como una extralimitación del uso riguroso del lenguaje. Ahora bien, al pensar la realidad como el resultado de una construcción activa del mundo, el constructivismo introduce un nuevo marco epistemológico en el que la metáfora se erige como una estrategia clave que facilita el discurso de la razón al descansar sobre imágenes de fenómenos previamente conocidos.

- El universo es un fluido de galaxias.
- El cerebro es un ordenador orgánico.
- Los electrones son ondas/partículas.
- Los espectros de emisión son las huellas digitales de los átomos.
- Somos polvo de estrellas.

Entre las muchas referencias que revelan este valor heurístico de la metáfora, merece especial atención la recogida en los *Diálogos* de Galileo, en la conversación entre Salviati y Simplicio sobre si la Tierra se mueve o si, tal y como sugería Aristóteles, se encuentra fija en el centro del universo. Simplicio

⁶⁸ La traducción es mía.

⁶⁹ Los subsiguientes apartados (4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3) obedecen a una revisión de los contenidos desarrollados en Salas (2017, 2020).

basa su argumentación en que, si la Tierra se moviera, un objeto dejado caer desde lo alto de una torre debería caer detrás de esta. Para refutar su postura, Salviati hace uso de la metáfora *La Tierra es una nave*.

Todos plantean como el mejor argumento el de los cuerpos graves que, cayendo de arriba abajo, llegan por una línea recta y perpendicular a la superficie de la Tierra. Lo que se considera un argumento irrefutable de que la Tierra está inmóvil [...] Dicho efecto lo confirman con otra experiencia, esto es dejando caer una bola de plomo desde la cima del mástil de *una nave que está quieta*, anotando la señal de donde percute, que está próximo al pie del mástil. Pero, si desde el mismo lugar se dejara caer la misma bola mientras la nave avanza, su punto de percusión estaría lejos del otro por tanto espacio cuanto la nave se hubiera deslizado hacia adelante en el tiempo de caída del plomo. Y eso es debido únicamente al hecho de que el movimiento natural de la bola liberada a sí misma es en línea recta hacia el centro de la Tierra (Galileo 1632, págs. 5-6).

Salviati se vale de esta metáfora naval para argumentar que el hecho de lanzar un objeto desde lo alto del mástil cuando la nave se encuentra en movimiento o en reposo resultará análogo al hecho de lanzar ese mismo objeto desde lo alto de una torre en tierra firme.

La piedra cae siempre en el mismo lugar de la nave, tanto si está quieta como si se mueve con cualquier velocidad. Por lo que, por ser la misma la argumentación referente a la Tierra que a la nave, del hecho de que la piedra caiga siempre perpendicularmente al pie de la torre no se puede inferir nada sobre movimiento o reposo de la Tierra (*Op. cit.*, pág. 25).

El valor heurístico de la metáfora permite la puesta en interacción de dos dominios de experiencia de acuerdo a un sistema conceptual unificado regido por un conjunto de redes complejas de significados ligadas a nuestro modo particular de interpretar el mundo. Al poner en relación ambos dominios, la metáfora revela nuevas implicaciones cognitivas necesarias para hacer accesibles ciertas ideas complejas; ideas que se construyen metafóricamente y que, de no ser así, quedarían fuera de toda consideración.

4.1.2. El valor catacrético de la metáfora

La metáfora consiste en dar a un objeto un nombre que pertenece a algún otro.

ARISTÓTELES, *Poética* (XXI, 1457B, 6-9).

Una de las manifestaciones más evidentes de la metáfora en el terreno de la ciencia se encuentra en la acuñación de términos científicos. Tradicionalmente se ha descrito la catacrexis (del griego *κατάχρησις*, “abusión”) como un recurso retórico que permite trasponer metafóricamente un término de nuestro léxico mental a una nueva realidad que carece de nombre propio. Nuestro sistema conceptual se activa a la hora de dotar de estructura verbal este nuevo dominio de experiencia, por lo que no debemos olvidar el giro referencial que esta acuñación lleva consigo, ya que la carencia de la referencia literal directa es lo que constituye tal catacrexis.

La facultad cognitiva y lingüística de nuestra especie nos permite postular la existencia de entidades y fenómenos que escapan a la observación directa a partir de la acuñación de nuevos conceptos que, gracias a mecanismos basados en el razonamiento y la verbalización, incorporan nuevas categorías con las que acometer el estudio de nuevas realidades: enana blanca, materia oscura, fluido electromagnético, línea de corriente, cuerda elástica, función armónica, etc. Esta génesis catacrética supone un problema de fondo a la hora de dar cuenta de la naturaleza empírica de estas nuevas realidades construidas metafóricamente. El problema reside en el alcance referencial del lenguaje natural humano para llevar a cabo descripciones complejas en el ámbito de la ciencia. En el caso de que un fenómeno fuera capturable de forma sensible, su descripción cobraría validez dentro de los límites de nuestros propios recursos intuitivos; sin embargo, cuando dicha elucidación profundiza en el estudio de la composición interna de la materia, nuestra capacidad de imaginar e inventar ligada a un ejercicio de racionalidad conduce a la inevitable formación de nuevos conceptos⁷⁰.

Cuando se adopta una perspectiva más amplia, histórica o diacrónica, muchas expresiones que tomamos como directas, convencionales o literarias, tienen un origen metafórico. Que su invención, introducción o

⁷⁰ Además de la catacrexis, existen otros modos de configurar nuevas relaciones semánticas en el lenguaje, como la acronimia (*WIMP* = *Weakly Interacting Massive Particle*), el entrecruzamiento (isospín = *isotopic spin*; *muon* = *mu meson*; *parsec* = *parallax second*; *pulsar* = *pulse stellar*), la prefijación (antimateria; hiperespacio; multiverso; subatómico), el acortamiento (*mole*, de *molecule*) o la derivación (bosón/fermión, de los físicos Satyendra N. Bose y Enrico Fermi; *gluon* (del inglés *glue*, “pegamento”), pues “pega” los quarks dentro de los nucleones); leptón/mesón (del griego *leptos* (“pequeño”) o *meso* (“mediano”), etc.).

aceptación requiere, o requirió en su momento, la creatividad vinculada a la metáfora y, por supuesto, su aceptación sostenida a lo largo del tiempo por parte de una comunidad de hablantes (Bustos 2016, pág. 3).

La presencia de catacresis en el ámbito de la ciencia ha planteado importantes cuestiones relativas al significado, como si los modelos y teorías se encuentran constituidos por términos de carácter metafórico. De ser así, sería necesario argumentar si estos nuevos términos adquieren referencia empírica o no. También, y no menos importante, sería interesante estudiar si la elección de un término en lugar de otro está ligada a un proceso de relación conceptual entre ambos dominios.; dicho de otro modo, si la presencia de un vacío léxico en el lenguaje se debe a la carencia de un término preciso que describa esa realidad, la elección de un término prefijado en nuestra lengua para someterlo a un proceso de remodelación en su significado para rellenar dicho vacío tendría que llevar consigo un ejercicio analógico de fondo. Esto vuelve a plantear serias dudas acerca de si resulta legítimo o no la inclusión de términos viejos para referir realidades nuevas de forma deliberada, ya que estos deberían ajustarse a un marco inteligible aceptado de forma unánime por todos los miembros de la comunidad científica.

El gran número de catacresis presentes en ciencia se debe, en primer lugar, a nuestra incapacidad para abarcar lingüísticamente todo el conocimiento que poseemos del mundo y, en segundo, a un repositorio de conceptos limitado con el que buscamos categorizar y designar cada aspecto del universo que habitamos. La referencia a una nueva realidad construida metafóricamente requiere la acuñación de un nuevo concepto o bien la prestación de uno viejo con el cual inferimos un cierto grado de asociación. Este proceso de catacresis permite dotar de estructura inferencial nuevas realidades y muestra un primer ejercicio de aproximación metafórica, ya que la elección de un concepto frente a otro está sujeto al modo en que deseamos abordar ese nuevo campo de experiencia.

4.1.3. El valor exegético de la metáfora

En ciencia, el lenguaje matemático se muestra decisivo en la captación y descripción cuantitativa de las regularidades y patrones de comportamiento observados en la física del mundo. La simbología matemática, ligada a un riguroso esfuerzo creativo, permite la formalización teórica y facilita la configuración de modelos que, en cierto modo, puede definirse como construcciones metafóricas de la realidad.

Según Lakoff y Núñez:

Las matemáticas son vistas como el epítome de la precisión [...]. Los símbolos son, por tanto, solo símbolos, no ideas. El valor intelectual que presentan las matemáticas yace en sus ideas, no en los símbolos mismos. Dicho de forma sencilla, el valor intelectual de las matemáticas no reside donde el rigor matemático puede ser fácilmente apreciable, digamos, en los símbolos. Reside en las ideas humanas⁷¹ (Lakoff & Núñez 2000, pág. XI).

La premisa de la que parten ambos autores se asienta en la idea de que los resultados aportados por el análisis matemático deben entenderse en términos cognitivos, ya que estos remiten a un ejercicio metafórico de origen. Las metáforas conceptuales (*conceptual metaphors*) y la integración conceptual (*conceptual blending*) funcionan como los principales recursos cognitivos con los que concebir las entidades matemáticas, ya que constituyen «un mecanismo neural que nos permite usar la estructura inferencial de un dominio conceptual para razonar sobre otro⁷²» (*Op. cit.*, pág. 6).

Cada una [metáforas conceptuales] es un mapeo unidireccional de entidades de un dominio conceptual a entidades correspondientes de otro dominio conceptual. Por tanto, las metáforas conceptuales son parte de nuestro sistema de pensamiento. Su función principal es permitirnos razonar acerca de dominios relativamente abstractos utilizando la estructura inferencial de dominios relativamente concretos. La estructura de los esquemas de imágenes está preservada por mapeados metafóricos conceptuales. En la metáfora, el mapeado conceptual entre dominios es primario; el lenguaje metafórico es secundario, derivándose del mapeo conceptual. Muchos términos para los conceptos del dominio fuente [*source domain*] se aplican también a conceptos correspondientes del dominio meta [*target domain*]⁷³ (*Op. cit.*, pág. 42).

La inferencia de un dominio fuente concreto habilita la inferencia de un dominio abstracto. Como ejemplo de ello, podemos traer a colación los diagramas de Venn, esquemas utilizados en teoría de conjuntos que permiten representar las relaciones de intersección, inclusión y disyunción sin cambiar la posición relativa de dichos conjuntos. Cuando se visualizan clases y conjuntos de esta forma, se utilizan esquemas de colecciones cognitivas para esbozar distintas relaciones matemáticas, como la relación ($a: B \subseteq A, b: A \cup$

⁷¹ La traducción es mía.

⁷² La traducción es mía.

⁷³ La traducción es mía.

$B, c: A \cap B$), diferencia ($d: A \setminus B$), diferencia simétrica ($e: A \Delta B$), y complemento ($f: C^B A$, y $g: A \cap (B \cup C)$, o $(A \cap B) \cup (A \cap C)$) (véase Fig. 1).

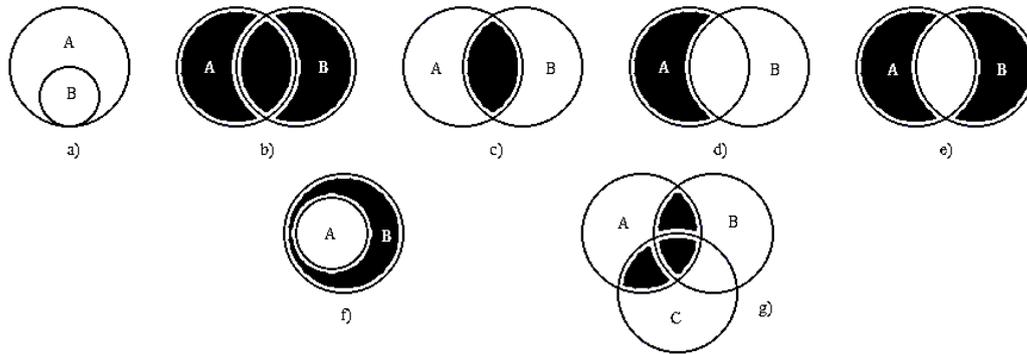


Fig. 1.

Los diagramas de Venn permiten la conceptualización metafórica de la lógica booleana en términos de estructuras contenidas, tornando primaria la lógica espacial y derivando secundariamente de ella la lógica abstracta gracias a la metaforización conceptual.

La principal dificultad que presenta la construcción del lenguaje matemático reside en el enorme esfuerzo conceptual necesario a la hora de trasladar los resultados obtenidos de los resultados experimentales a un plano simbólico. Este ejercicio comienza con una primera fase de acercamiento intuitivo que surge ante un impulso de describir cuantitativamente un aspecto del mundo. La formalización cuantitativa requiere, en primer lugar, ser sometida a un ejercicio de abstracción conceptual sobre magnitudes mensurables (aceleración, tiempo, fuerza, energía, temperatura, etc.) para, posteriormente, dotar de inferencia cualitativa el resultado. Es aquí donde el valor exegético (del griego ἐξήγησις, “explicar”) de la metáfora hace su aparición, ya que, al operar sobre criterios analógicos, permite conectar una formalización abstracta con una comprensión racional del mundo, facilitando la interpretación cualitativa de los datos cuantitativos y volviendo cognoscibles realidades nuevas a partir del lenguaje simbólico de la matemática.

5. Grandes metáforas en la historia de la ciencia

Durante milenios, la metáfora ha actuado como el filtro de la percepción por parte de diferentes culturas y sociedades, verbalizando el poder propio del ingenio humano y redefiniéndose según la experiencia acumulada. En una época anterior en la que caprichosas agrupaciones estelares cautivaban la imaginación de nuestros antepasados mostrando épicas batallas entre héroes y bestias, distantes puntos de luz se revelaban como referentes metafóricos que cobraban significado y sentido en la contemplación del cielo nocturno. El propósito de entender el mundo y de establecer con él un diálogo dio paso a que muchas metáforas se consolidaran como verdaderos supuestos metafísicos de la naturaleza, delimitando el campo de experiencia sobre el que operaba el conocimiento y la acción humana. El universo percibido como un organismo vivo, como una gran maquinaria o como un libro escrito en lenguaje matemático, son algunas de las grandes metáforas que nuestra especie ha impuesto a la realidad y que han servido como fuente de inspiración para la reflexión y el estudio del mundo empírico.

5.1. Phýsis

La *phýsis*, en suma, es principio y fundamento, y a su esencia pertenecen la divinidad, la fecundidad, la necesidad y la regularidad.

PEDRO LAÍN ENTRALGO, *El cuerpo humano*

El deseo de saber qué es y cómo funciona el mundo llevó al ser humano a interesarse por la relación existente entre el lenguaje y las cosas. En su intento por capturar lingüísticamente la realidad en su plena esencia, los griegos bautizaron el mundo físico con el nombre de *phýsis* (del griego φύσις), sustantivo forjado del verbo *phýo* (φύω, “crecer” o “brotar”). En su introducción a la *Física* aristotélica, Echandía presenta una aproximación onomasiológica al estudio del término como esencia del mundo: «En efecto,

phýsis no era una región especial del ente, sino que en la tradición griega designaba todo cuanto existe en el Universo: los astros, la materia inerte, las plantas, los animales y el hombre⁷⁴» (Aristóteles 1995, pág. 10). Conviene precisar que en griego antiguo un sustantivo que remite al mismo tiempo a una acción y a su resultado puede derivarse por medio del sufijo *-sis* (Holt 1941), denotando «la noción abstracta del proceso entendido como una realización objetiva» (Benveniste 1948, pág. 80). Esto explica por qué el término *phýsis* evocaba en la Antigua Grecia el proceso una vez completado de un devenir, del destino físico de algo con todas y cada una de sus propiedades (Naddaf 2005).

En la *Odisea*, Homero hace uso del término por vez primera atribuyéndole un significado que posteriormente heredarían sus sucesores griegos: «Tal diciendo, el divino Argifonte entrégome una hierba que del suelo arrancó y, a la vez, me enseñó a distinguirla; su raíz era negra, su flor del color de la leche; ‘molu’ suelen llamarla los dioses; su arranque es penoso para un hombre mortal; para un dios todo, en cambio, es sencillo» (Homero 1993, pág. 254). En el fragmento de Homero, la *phýsis* apela a una contraposición metafórica entre la verdadera naturaleza de la planta, sus poderes curativos, y su apariencia externa perceptible, sus cualidades secundarias (aspecto, color, tamaño, etc.), pues estas últimas son percibidas perfectamente por Homero sin necesidad alguna por parte de la diosa⁷⁵. Este mismo significado es recuperado años más tarde por Heráclito, para quien los hombres se precian en «distinguir cada cosa según sea su *phýsis* (DK22B1), pese «al gusto de esta por ocultarse» (DK22B123). Esta primera atribución semántica otorga un carácter dinámico al propio concepto al apuntar que revelar la *phýsis* de algo consiste en desentrañar su más intrínseca naturaleza, el modo en que este se originó y desarrolló (Kirk 1954).

5.1.1. La *phýsis* como origen

Entre los muchos testimonios que avalan las distintas máscaras metafóricas que la *phýsis* ha asumido a lo largo de la historia del pensamiento occidental, vale la pena rescatar dos provenientes de dos obras cumbre del pensamiento clásico. La primera, las *Leyes* de Platón, en la que se apela a la *phýsis* como origen: «Con naturaleza quieren decir la generación de las primeras cosas» (Platón 1999, pág. 201). La segunda, la Física aristotélica, donde la *phýsis* abraza la idea de la totalidad: «Por eso algunos dicen que la naturaleza de las cosas es el fuego; otros, que la tierra; otros, que el aire; otros, que el agua; otros, que varios de estos elementos; otros, que todos ellos» (Aristóteles 1995, págs. 47-48); idea que el Estagirita reitera en su *Metafísica*:

De los que primero filosofaron, la mayoría pensaron que los únicos principios de todas las cosas son de naturaleza material, y es que aquello de lo cual están constituidas todas las cosas que son, y a partir de lo cual primeramente se generan y en lo cual últimamente se descomponen, permaneciendo la entidad por más que ésta cambie en sus cualidades, eso dicen que es el elemento, y eso el principio de las cosas que son, y de ahí que piensen que nada se genera ni se destruye, puesto que tal naturaleza se conserva siempre (Aristóteles 1994, págs. 80-81).

Tales (ca. 623-540 a.C.), por su parte, fue el primer filósofo en promover la idea del agua como primera sustancia, la fuente de la que todo nace y emerge, una premisa filosófica que allanó el sendero al surgimiento de posteriores contraposiciones teóricas. Entre ellas, la propuesta por Anaxímenes (ca. 585-524 a.C.), para quien el aire era el principio primero; o por Heráclito, quien apuntó al fuego dada su constante y universal mutabilidad. Años después, en su tratado *Peri physeōs*⁷⁶, Parménides (ca. 515 a.C.) ofreció una narración metafórica sobre el origen de la luz, la oscuridad y los astros fundamentada en la *phýsis*; narración que, un siglo antes, Anaximandro (ca. 610-547 a.C.) recogió en su obra homónima⁷⁷, preservando los supuestos de Tales sobre la existencia de un orden cósmico y valiéndose de la *phýsis* como metáfora de lo viviente para elaborar una descripción racional del mundo⁷⁸.

⁷⁴ De ahí que la expresión *physei ónta* (del griego τα φύσει όντα, “entidades naturales”) buscara capturar lingüísticamente los distintos modos en que puede ser, existir o producirse una entidad en el mundo, en contraposición a *techné ónta* (del griego τα τέχνη όντα, “entidades artificiales”), creadas estas a partir de la planificación y la acción humana.

⁷⁵ Benveniste, en su trabajo sobre los sustantivos griegos acabados en *-sis*, sugiere que la *phýsis* de Homero puede definirse como «la naturaleza de algo como se realiza, con todas sus propiedades». Cf. Benveniste (1948, págs. 78-79).

⁷⁶ En el marco de la filosofía presocrática, muchas de las obras circulaban bajo el título: *Peri physeōs* (del griego Περί φύσεως, “Sobre la naturaleza”), una denominación que apuntaba de forma intencionada al modo preciso de investigación de esta escuela filosófica. Cf. Naddaf (2005, pág. 28 y ss.).

⁷⁷ La obra de Anaximandro se conoce a través de Aristóteles. Aunque no se conserva ninguna copia original de su obra, es probable que esta se encontrase en la biblioteca de Liceo. Al parecer, Apolodoro (ca. II a.C.) tuvo acceso a una copia en la Biblioteca de Alejandría, mientras que otra copia de la obra se encontraba en la biblioteca de Taormina, en Sicilia, donde el nombre de Anaximandro aparece recogido en un fragmento de un catálogo antiguo. Los únicos fragmentos que han pervivido hasta la actualidad han sido los citados en el siglo VI por Simplicio al glosar un texto de Teofrasto.

⁷⁸ Los *Peri physeōs* son un conjunto de obras griegas que versan acerca de los fenómenos naturales, su descripción y discusión de la causa de los mismos. El interés de estos escritos no reside tanto en la exactitud de sus postulados, sino en el modo en que cada uno articula su doctrina de pensamiento. Todos ellos, de un modo u otro, incorporaban en su esquema general de pensamiento, y como

Por su parte, Eurípides (ca. 480-406 a.C.) resalta el velo metafórico de la *phýsis* como aproximación especulativa al origen del mundo: «Bienaventurado aquel que abraza la ciencia sin ansiar dolor para sus compatriotas ni realizar acciones injustas, pues este anhela lo que por naturaleza es inmortal, de donde todo converge y emerge. Hombres tales no albergan apego a acciones indignas» (DK59A30).

La φύσις, entendida como el salir o brotar, puede experimentarse en todas partes, por ejemplo, en los procesos celestes, en las olas del mar, en el crecimiento de las plantas, en el nacimiento de los animales y hombres desde el vientre materno. Pero φύσις, la fuerza imperante que brota, no significa lo mismo que esos procesos [...] La φύσις es el ser mismo, en virtud de lo cual el ente llega a ser y sigue siendo observable [...] Los griegos no han experimentado los que es la φύσις en los procesos naturales, sino a la inversa; a partir de una experiencia radical del ser, poética e intelectual, accedieron a lo que ellos tenían que llamar φύσις. Solo sobre la base de tal acceso, pudieron observar la naturaleza en sentido riguroso (Heidegger 2001, pág. 23).

La significación que la *phýsis* adopta en Eurípides se revela también en un afamado fragmento de Empédocles (ca. 495-435 a.C.): «Os haré saber que no hay nacimiento de todas las cosas mortales, ni tampoco fin alguno de muerte ruinosa, pues solo hay mezcla y separación de las cosas mezcladas, por más que los mortales lo denominen origen» (DK31B8). Esta remisión de la *phýsis* a la idea primigenia de origen, y de proceso a partir del cual surgen nuevas entidades, se vio atestiguada posteriormente en el *Corpus hippocraticum* donde Hipócrates (ca. 460-370) vincula la noción de *phýsis* con el ámbito de la medicina, proyectando su dimensión metafórica al estudio de los distintos elementos que componen la naturaleza humana, así como su relación entre ellos.

Del seno de la medicina del siglo V a.C. nacieron nuevas interpretaciones metafóricas en torno a la *phýsis* que dirigían su atención al hombre. Su vinculación con la naturaleza social y humana sirvió para redefinir su significado a partir de la idea de *techné*, o lo que es lo mismo, del método empleado para estudiar la *phýsis* dentro de una realidad tangible. Esta *téchnē iatrikē* (del griego τέχνη ιατρική, *Ars medica*) permitió, por un lado, establecer una serie de analogías entre los eventos cósmicos y la naturaleza humana, entre el origen del mundo y el origen del hombre, y, por otro, construir una imagen coherente de los fenómenos naturales y acometer su estudio a partir de la investigación empírica⁷⁹.

El concepto de la naturaleza humana que hallamos con tanta frecuencia en los sofistas y sus contemporáneos, nació en las esferas de la medicina científica. El concepto de *phýsis* es transportado de la totalidad del universo a la individualidad humana y recibe así una matización particular [...] Del concepto médico de la *phýsis* humana, como organismo corporal dotado de determinadas cualidades, se pasa pronto al concepto más amplio de la naturaleza humana tal como la hallamos en las teorías pedagógicas de los sofistas (Jaeger 2001, pág. 57).

Naddaf (2005), en su estudio sobre la *phýsis*, alude al *Corpus Hippocraticum* para establecer una analogía entre el esperma del hombre y la metáfora de la semilla como origen de la concepción. Esta última, procedente del padre, germina en el vientre materno y, una vez dentro, describe una evolución análoga al crecimiento de una planta (Lonie 1981, pág. 18). El significado que Naddaf otorga a la expresión de Hipócrates es claro, pues cuando se trata de indagar en la *phýsis* de algo se ha de considerar también el propio proceso. En el caso del embrión, no se trata solo de conocer la forma en que este es, sino también cómo este llegó a ser. Esta idea recupera la atinada observación de Aristóteles: «Pues la génesis es por el bien de la esencia, no la esencia por el bien de la génesis» (Aristóteles 1961, pág. 60), ya que para el Estagirita todo proceso es cíclico, razón por la cual cada vez que un ser nace debe engendrar un ser similar a sí mismo para participar en lo eterno y lo divino *ad infinitum*.

La *phýsis* como origen pronto se vio proyectada al terreno de la filiación. Muestra de ello es el empleo Sófocles hace del término (ca. 496 - 406 a.C.) en *Filoctetes*:

Sé bien, hijo, que no está en tu *naturaleza* [φύσει] decir este tipo de cosas ni urdir maldades (Mársico 2011, pág. 93).

Pero noble es tu *naturaleza* [φύσις] y de nobles provienes, niño (*Op. cit.*, pág. 93).

Absolutamente todo es repugnante cuando uno realiza, abandonando la propia *naturaleza* [φύσιν], actos inadecuados (*Op. cit.*, págs. 93).

Así como en *Edipo en Colono*, donde asume una significación similar:

Edipo: No, no me preguntéis quién soy ni tratéis de averiguar más.

razón última de toda realidad, la *phýsis* bajo dos significaciones compartidas: como origen, como aquello que da nacimiento a algo, y como entidad engendrada de ese mismo proceso. Cf. Rossetti (2015).

⁷⁹ Esto explica por qué para los primeros fisiólogos [φυσιολόγοι] presocráticos, la *phýsis* apelaba a esa fuerza primigenia que se manifiesta tanto en el ser humano como en todos y cada uno de los fenómenos de la naturaleza.

Coro: ¿Qué significa esto?

Edipo: Un terrible *origen* [φύσις] (*Op. cit.*, pág. 94).

La metáfora física de la religión homérica sembró la semilla de un nuevo modo de percibir el mundo, originado este en un proceso dinámico y divino. La *phýsis*, como fuerza que vertebra tanto el orden cósmico como la propia naturaleza humana, promovió la apertura de la razón a partir de una metáfora que explicaba el mundo como resultado de un proceso originado a partir de un estado primigenio. Esta aproximación metafórica al estudio del mundo se manifiesta en la cosmovisión griega de un universo autónomo y dinámico cuya naturaleza se percibe al mismo tiempo como física y biológica, la cual mantiene el orden, asigna límites y diseña el destino físico del mundo atendiendo a su autorregulación orgánica, comprendiendo a su vez todos y cada uno de los detalles.

5.1.2. La *phýsis* como fin

En su *Metafísica*, Aristóteles atribuye a la *phýsis* un total de cinco significaciones:

1. «La generación de las cosas que crecen» (Aristóteles 1994, pág. 213).
2. «Lo primero a partir de lo cual comienza a crecer lo que crece, siendo aquello inmanente» (*Op. cit.*, pág. 213).
3. «Aquello de donde se origina primeramente el movimiento que se da en cada una de las cosas que son por naturaleza y que corresponde a cada una de éstas en tanto que es tal» (*Op. cit.*, pág. 213).
4. «Lo primero de lo cual es o se genera cualquiera de las cosas que son por naturaleza, siendo aquello algo informe e incapaz de cambiar su propia potencia» (*Op. cit.*, págs. 213-214).
5. «La entidad de las cosas que son por naturaleza» (*Op. cit.*, pág. 214).

Como rasgo común a todas las significaciones, podría decir que para el Estagirita, la *phýsis* responde a aquello que existe conforme a un fin, ya que el término sugiere una implicación teleológica que redefine el concepto como el conjunto de causas que operan en atención a algo (Russell 1997). Así lo expresa el propio Aristóteles: «La naturaleza [*phýsis*] es un principio y causa de movimiento o del reposo en la cosa a la que pertenece primariamente y por sí misma, no por accidente» (Aristóteles 1995, pág. 45). En su obra *Cambio social e historia*, Nisbet recupera este planteamiento de la *phýsis* como principio intrínseco de todo movimiento aplicado a un ente natural:

Si la naturaleza de una cosa, pues, es la forma en que crece, y todo el universo, tanto físico que social, tiene una *phýsis* propia, una forma distintiva de crecer, un ciclo de vida, la tarea del filósofo o científico es clara. Es averiguar cuál es la *phýsis* de cada cosa: aprender su condición original, sus etapas sucesivas de desarrollo [...] y, por último, cuál es su “fin”, es decir, su forma final, la forma que puede decirse que es la causa “última” de todo ello (Nisbet 1976, pág. 11).

Según Nisbet, la *phýsis* no solo remite a la esencia del movimiento, sino también al efecto del mismo, facilitando así una imagen unificada del mundo que culmina con su versión metafórica: *La phýsis como poder generativo y causativo de la naturaleza de las cosas*.

Como causa y efecto, la *phýsis* se proclama como el principal recurso metafórico con el que dar cuenta de los procesos de generación y decadencia del universo. Para Aristóteles, todo cuanto comprende el cosmos obedece a un orden jerárquico⁸⁰, de modo que todas y cada una de las entidades que conforman el mundo físico tienden, a juicio del Estagirita, a ocupar el lugar que les corresponde según su ordenamiento natural, o sea, su *phýsis*. Asimismo, es preciso destacar el carácter teleológico que Aristóteles atribuye al concepto, pues cada entidad no solo ocupa un lugar específico según su jerarquía natural, sino que además tiende a cumplir con su más íntima finalidad. Así pues, la Tierra se encuentra situada en el centro del universo y, en torno a ella, orbitan de forma uniforme el resto de los astros y cuerpos celestes trazando circunferencias de esferas concéntricas transparentes. Respecto al número de esferas necesarias para dar cuenta del movimiento de los planetas, Aristóteles expone en su *Metafísica*:

Pero si todas ellas conjuntadas han de dar cuenta de los fenómenos, es necesario que haya, por cada planeta, otras tantas esferas, menos una, que giren hacia atrás y que devuelvan siempre a la misma posición a la primera esfera del astro que se haya situado debajo. Pues solamente así resulta posible que todas ellas den como resultado la traslación de los planetas. Y puesto que las esferas en que éstos se desplazan son ocho por un lado y veinticinco por otro, y las únicas que no es necesario que sean arrastradas para atrás son aquellas

⁸⁰ Para Aristóteles, al igual que existen objetos superiores con un mayor grado de perfección —los astros y cuerpos celestes—, también existen objetos inferiores —las entidades sublunares—, una distinción que parece recuperar de algún modo el dualismo platónico.

en que se desplaza el planeta situado más abajo, las que tiran de los dos primeros hacia atrás serán seis y, de los cuatro siguientes, dieciséis. Y el número de todas, de las que los transportan más de las que tiran hacia atrás de ella, cincuenta y cinco. Y si al Sol y a la Luna no se les asignan los movimientos que decimos, las esferas harán un total de cuarenta y siete. [...] Sea, pues, éste el número de las esferas (Aristóteles 1994, pág. 492-493).

Asimismo, en *De Coelo*, reitera su visión geocéntrica del cosmos y sitúa de nuevo a la Tierra en el centro del mismo, afirmando que el movimiento natural de esta es hacia el centro, más como este es ocupado por ella misma, su estado natural será de reposo, por lo que el acto de lanzar una piedra o dejar caer un objeto desde una torre supondrá una acción contraria a su propia naturaleza. Se aprecia así el valor metafórico de la *phýsis* en el carácter teleológico del sistema cosmológico de Aristóteles. En primer lugar, en su descripción de la Tierra, inmóvil en el centro, y a su alrededor, incrustados en esferas concéntricas, el resto de cuerpos celestes trazando órbitas perfectas en torno a esta⁸¹. El movimiento de estos cuerpos obedece a un último motor inmóvil que engendra directamente un movimiento circular sobre la última esfera, más allá de la cual no existe nada. Esta última esfera, transmite el movimiento al resto de esferas concéntricas y al mundo sublunar. En lo que respecta a las entidades sublunares, estas quedan más cerca de la experiencia cotidiana, mientras que los objetos celestes corresponden a un orden superior de existencia.

De forma análoga a lo que ocurre con las entidades físicas, la sociedad se encuentra sometida a un proceso de continuidad y evolución hasta alcanzar un estado perfecto o *polis* cuya estructura jerárquica no se rige por un criterio de voluntad racional acorde al consentimiento de sus ciudadanos, sino que obedece a causas naturales⁸², ocupando cada individuo dentro de su comunidad el lugar que le viene dado por naturaleza.

Si uno observa desde su origen la evolución de las cosas, también en esta cuestión, como en las demás, podrá obtener una visión más perfecta. En primer lugar, es necesario que se emparejen los que no pueden existir el uno sin el otro, como la hembra y el macho con vistas a la generación (y esto no en virtud de una decisión, sino como en los demás animales y plantas; es natural la tendencia a dejar tras de sí otro ser semejante a uno mismo), y el que manda por naturaleza y el súbdito, para su seguridad. En efecto, el que es capaz de prever con la mente es un jefe *por naturaleza* y un señor natural, y el que puede con su cuerpo realizar estas cosas es súbdito y esclavo *por naturaleza*; por eso al señor y al esclavo interesa lo mismo (Aristóteles 1988, págs. 46-47).

Así, Aristóteles manifiesta como evidente que «la ciudad es una de las cosas naturales, y que el hombre es por naturaleza un animal social⁸³» (*Op. cit.*, pág. 50) encaminado a conformar comunidades cada vez más sofisticadas y perfectas. Para los griegos en general, y para Aristóteles en particular, un individuo aislado, sin formar parte integral de una comunidad política, se muestra como algo inconcebible. El individuo solo puede ver realizada su propia naturaleza en la medida en que este participe de la actividad pública y social dentro de su comunidad, por lo que «entre aquella sociedad originaria y primitiva, y la sociedad última y perfecta —el Estado o la *polis*— hay, más que oposición o ruptura, una relación de continuidad o progresión» (Palma 2008, pág. 40). Al igual que el cambio de la organización familiar a la *polis* viene regido por un progreso natural y gradual, el universo obedece a un orden teleológico en el que cada una de las entidades que conforman el mundo físico contiene en potencia la capacidad de desarrollar sus características esenciales, es decir, aquellas que le hacen ser lo que es y no otra cosa, siendo la puesta en acto de esas potencialidades el desarrollo de su finalidad esencial.

[Los] griegos siguieron estando estrechamente vinculados al cosmos, como resultado de su concepción del cosmos como un organismo vivo, un cuerpo que podía ser entendido y comprendido en su totalidad. El griego tenía una profunda consciencia que se caracterizaba por su aproximación biológica al mundo de la materia. El principio teleológico es esencialmente biológico y antropomórfico, de manera que la primera base para la concepción del orden del cosmos se encontró en el sistema del mundo de los seres vivos (Sambursky 1990, pág. 272).

Para los griegos, todo cuanto comprende el universo está encaminado a un cierto fin, un destino físico resultado de un plan previo. La armonía en su desarrollo no surge por sí misma ni por la acción de un principio físico, sino mediante la fuerza de una ley inteligente que tiende a la perfección. El carácter

⁸¹ La concepción esférica del cosmos aristotélico es herencia del pensamiento platónico, según el cual cualquier modelo físico válido del cosmos solo puede ser perfectamente expresado si se utilizan trayectorias celestes circulares. Si bien hay razones para creer que la teoría del universo esférico, inspirada esta por las filosofías babilónicas, egipcias y orientales, fue adelantada por Pitágoras, es en *Timeo* donde Platón desarrolla esta idea al intentar asociar proporciones matemáticas y sonidos musicales a los movimientos celestes. Cf. Platón (1992).

⁸² La propuesta de Aristóteles comulga con la visión platónica del estado según la cual las leyes, al igual que la *phýsis*, tienen una fundamentación que trasciende la mera convención.

⁸³ En este contexto, πολιτικὸν ζῷον se traduce como “animal social”, una traducción un tanto vaga e imprecisa, pues ζῷον quiere decir “ser viviente”, y el adjetivo πολιτικόν, “de la *polis*” o “perteneciente a la *polis*”; no obstante, no debe entenderse el término *polis* bajo la imagen de la sociedad actual, sino como agrupación o comunidad política.

teleológico que Aristóteles atribuye a la *phýsis* permite establecer un conjunto de analogías entre el modo en que emergen y evolucionan las entidades naturales y el orden jerárquico de una sociedad ideal o *polis*, sugiriendo que, si todo ente natural persigue un fin previamente definido, toda derivación impuesta por la mano del hombre alteraría la noble armonía del mundo. Así lo expresa en su *Política*:

La comunidad perfecta de varias aldeas es la ciudad, que tiene ya, por así decirlo, el nivel más alto de autosuficiencia, que nació a causa de las necesidades de la vida, pero subsiste para el vivir bien. De aquí que toda ciudad es por naturaleza, si también lo son las comunidades primeras. La ciudad es el fin de aquellas, y la naturaleza es fin. En efecto, lo que cada cosa es, una vez cumplido su desarrollo, decimos que es su naturaleza (Aristóteles 1988, págs. 49-50).

Aristóteles emplea el término *phýsis* en sentido literal para su filosofía del estado, según la cual las causas del cambio de las estructuras sociales no se explican atendiendo al origen histórico de la aparición de las distintas instituciones, desde la familia hasta la *polis*, sino al cambio y evolución a la que estas se ven sometidas.

5.1.3. La *phýsis* como cambio cíclico

Cuando Perséfone fue raptada por Hades, su madre, Deméter, diosa de la vida y la regeneración, desconsolada, descuidó la tierra provocando malas cosechas. Consternado, Zeus, en socorro del hombre, exigió a Hades que la liberara. Obligado a obedecer, Hades da de comer a Perséfone seis semillas de granada con las que, en virtud de un hechizo, la obligaría a regresar seis meses cada año. Así, Deméter devolvió la fertilidad a la tierra; sin embargo, su dolor retornaba cada vez que su hija regresaba con Hades, razón por la que la desolación del invierno y la muerte de la vegetación eran consideradas como la manifestación anual del dolor de Deméter cuando su hija la abandonaba. La analogía de la semilla, sembrada en la tierra que con el tiempo germina, prescribe los principios teóricos de la cosmovisión griega a la vez que se entrega a un gran número de reflexiones en cuanto al destino del cosmos y del hombre.

En su diálogo *Político*, Platón plantea lo siguiente:

Escúchame bien. En lo que toca a este, nuestro universo, durante un cierto tiempo dios personalmente guía su marcha y conduce su revolución circular, mientras que, en otros momentos, lo deja librado a sí mismo, cuando sus revoluciones han alcanzado ya la medida de la duración que les corresponde; y es entonces cuando él vuelve a girar, espontáneamente, en sentido contrario, porque es un ser viviente y ha recibido desde el comienzo una inteligencia que le fuera concedida por aquel que lo compuso (Platón 1988, pág. 527).

No menos convencido de la naturaleza cíclica del mundo, manifestada esta en la salida y puesta del Sol, del día y la noche y en la llegada de las estaciones, Aristóteles, por su parte, expresa en *De Caelo*: «[Pensar que el universo] se constituye y se disuelve alternativamente, es no hacer otra cosa sino afirmar que es eterno, pero que cambia de forma» (Aristóteles 1996, pág. 91). Asimismo, el Estagirita reitera en *De Generatione*: «[Si] la generación de una cosa adviene por absoluta necesidad, necesariamente debe ser cíclica y tornar sobre sí» (Aristóteles 1987, pág. 120). Así, la *phýsis* se consagra, por un lado, como principio constitutivo de la distinción entre lo necesario y natural y, por otro, de lo accidental y lo causal. Todo cuando se muestra natural y necesario se corresponde con lo viviente, a la vez que experimenta un cambio cíclico que comprende las fases de nacimiento, desarrollo y decadencia.

Esta visión de la *phýsis* como cambio cíclico extiende su dominio de acción al ámbito de la antropología, considerando la evolución propia de la sociedad como un proceso de cambio orgánico y no como la mera secuencia sucesiva de episodios y eventos definidos históricamente. Esta distinción resulta crucial, pues revela el reflejo del pensamiento griego a la hora de interpretar el propio devenir del hombre, rechazando la descripción de la sociedad como una genealogía de hechos históricos y abrazando una perspectiva evolutiva basada en los cambios emergentes y graduales de una institución, desde la mera agrupación familiar a la consolidación del estado ideal o *polis*.

En suma, la *phýsis* como metáfora de lo viviente, ya sea como origen, como fin o como cambio cíclico, nace de una visión intuitiva del mundo, como un remanente gnoseológico conceptualizado en la inmanencia del pensamiento. Rescatando las palabras de Guthrie: «No existe transición alguna entre el mito y la mentalidad racional [...] Hemos abandonado el lenguaje de la mitología y cubierto de mitología la razón, lo que quizá la hace más peligrosa⁸⁴» (Guthrie 1957, págs. 15-16). Evidencia de ello fue el empeño de los filósofos griegos en desterrar el mito como basamento explicativo y valerse de la *phýsis* para instaurar una máscara metafórica del mundo tanto en el orden natural como en su vertiente social, cultural y política. Desde la representación de lo divino y sobrenatural en su carácter teleológico hasta la mutabilidad que presenta el cambio y transformación de todo ser viviente, la *phýsis* teje un hilo de Ariadna entre el *mýthos*

⁸⁴ La traducción es mía.

y el *lógos*, creando una proyección metafórica de la propia experiencia que llevaba implícita la más tácita expresión humana.

5.2. Mecanicismo

Nunca me doy por satisfecho hasta que he hecho un modelo mecánico de algo. Si puedo hacer un modelo mecánico, lo entiendo.

WILLIAM THOMSON

Vale más descubrir una relación causal que recibir la corona de Persia.

DEMÓCRITO

El mecanicismo da nombre a una serie de innovaciones originadas durante los siglos XVI y XVII. En términos históricos, la revolución científica nace en 1543 con la aparición de *De revolutionibus orbium coelestium* de la mano de Nicolás Copérnico y culmina con la publicación de los *Principia* de Newton en 1687. Este periodo histórico trajo consigo un cambio en la concepción del mundo que superó los valores heredados de la Edad Media⁸⁵, un cambio de perspectiva que por vez primera interpretaba el universo bajo la metáfora de la máquina. Robert Boyle (1627–1691), químico y filósofo naturalista de origen inglés, sostuvo que todos los fenómenos químicos, así como los biológicos y, en general, todos los fenómenos naturales, se mostraban susceptibles de explicarse a través de este nuevo paradigma mecanicista, paradigma que se fundamentaba en dos tesis fundamentales: la primera, la analogía entre el orden natural y el funcionamiento de una gran maquinaria de precisión matemática; la segunda, la asunción de que cualquier aspecto del mundo puede describirse en términos de materia y movimiento.

Lakatos describe el paradigma mecanicista como «un gigantesco mecanismo y un sistema de vórtices, en el que el empuje es la única causa del movimiento» (Lakatos 1983, pág. 66). Por su parte, Kuhn, a partir de los trabajos realizados por Descartes, sostiene que el universo está «compuesto de corpúsculos microscópicos y que todos los fenómenos naturales podrían explicarse en términos de tamaño, forma, movimiento e interacción corpuscular» (Kuhn 2004, pág. 85). Asimismo, en el último capítulo de su obra *La Revolución copernicana*, el propio Kuhn (1978 [1957]) apela a dos problemas de base que forjaron la transición del modelo heliocéntrico copernicano al modelo newtoniano, sin duda alguna, el fruto más acabado de la doctrina mecanicista: el primero, relativo al problema de hallar las leyes que Dios había impuesto desde el momento de la creación como causantes del movimiento efectivo de todas las entidades corpusculares; el segundo, relacionado con el movimiento de los cuerpos celestes.

Newton pudo deducir dos consecuencias físicas de extraordinaria importancia. De un lado, estableció que, si la velocidad de un planeta y el radio de su órbita están vinculados entre sí por la tercera ley de Kepler, la atracción que tira del planeta hacia el sol debe decrecer en razón inversa al cuadrado de la distancia entre ambos. Así pues, un planeta situado a doble distancia del sol sólo necesita una cuarta parte de su fuerza atractiva para permanecer en su órbita circular con la misma velocidad observada. El segundo de los descubrimientos de Newton es igualmente de gran alcance. Se percató de que esta misma ley que regía la atracción entre el sol y los planetas explicaba perfectamente bien la diferencia entre las velocidades con que “caían” hacia la tierra la distante Luna y una piedra (*Op. cit.*, págs. 326-327).

El nuevo paradigma mecanicista recuperó una filosofía de corte materialista que en su origen fue impulsada por Demócrito y Empédocles, y retomada posteriormente por Epicuro y Lucrecio. Esta renovada visión del mundo parte de la premisa de que todos los fenómenos naturales, así como sus propiedades sensibles y el modo en que estos interactúan entre sí, pueden ser descritos causalmente en términos de disposición y movimiento de partículas materiales más pequeñas —corpúsculos—, cada una de estas caracterizada por determinadas propiedades fundamentales e irreducibles. Este nuevo modo de acometer los fenómenos naturales asumía además carácter teleológico en la medida en que percibía el universo físico como una gran maquinaria que, una vez puesta en funcionamiento, realiza la labor para la cual fue diseñada. Esta visión presupone la existencia de un creador consciente e inteligente que, además de haber creado el mundo, haya otorgado a este algún fin particular.

⁸⁵ Algunos historiadores están de acuerdo en que las innovaciones surgidas a partir de la revolución científica marcaron un hito en la historia de la ciencia, la más importante ocurrida desde el pensamiento cosmológico en Grecia. Cf. Koyré (1980) y Holton (1982). Otros, por el contrario, sugieren que muchas de las nociones de mecánica y física que se pensaron originales no fueron sino la lenta y progresiva maduración de conceptos que se fraguaron en las escuelas medievales. Cf. Duhem (1913), Crombie (1996) y Clagett (1959).

A diferencia de Aristóteles, quien promulgó una imagen del mundo análoga a la de un organismo vivo, el mecanicismo apela a las acciones de los cuerpos y a las fuerzas gravitatorias, tesis sobre las cuales Newton buscó explicar todos y cada uno de los fenómenos de la naturaleza. Esta nueva imagen del mundo percibida como una gigantesca maquinaria de precisión matemática trasciende la mera analogía mecanicista, ya que asume que a nivel corpuscular existen mecanismos que funcionan de forma similar a ciertas máquinas que producen resultados predecibles. Esta metáfora permitió incorporar a los presupuestos generales de la filosofía de aquel momento descripciones causales y comprensiones teóricas con las que proveer una imagen del mundo susceptible de ser estudiada mediante el análisis matemático y la verificación experimental. Al mismo tiempo, la metáfora mecanicista —o corpuscular— facilitó la combinación del análisis matemático con el método experimental a partir las propiedades geométricas que presentan los corpúsculos materiales y las interacciones mecánicas que se dan entre ellos.

El mecanicismo adoptó dos fuentes primarias de inspiración: en primer lugar, una teoría que diera cuenta de todas y cada una de las entidades y fenómenos de la naturaleza y, en segundo, un criterio general acerca del modo en que dichas entidades y fenómenos interactúan. Esta metáfora mecanicista permite la puesta en interacción de un conjunto de correlaciones parciales de identidad —analogías— entre la forma y disposición de cada una de las partes de un sistema y su funcionamiento, constituyendo un nuevo marco teórico por el cual todas las entidades materiales están formadas por corpúsculos materiales con propiedades específicas que obedecen ciertas leyes que rigen su comportamiento. Ambas fuentes, la ontología corpuscular del mundo y el conjunto de leyes por las que este se rige, consolidan la raíz epistemológica de la metáfora mecanicista.

5.2.1. Ontología corpuscular de la metáfora mecanicista

En primer lugar, por universo se entiende la totalidad de las cosas que existen. El escenario teórico en el que se fundamenta la metáfora mecanicista permite dotar de estructura material la realidad, volviéndola tangible y, por ende, susceptible de ser comprendida a partir de la verificación experimental. Desde un punto de vista ontológico, el mecanicismo parte de la premisa de que el cosmos está constituido por un tipo de materia única y homogénea, discontinua y granular, formada por corpúsculos indivisibles. Estas partículas corpusculares quedan fuera de toda percepción sensible, por lo que su naturaleza asume carácter especulativo. Cada una de estas partículas interactúa con las otras sin alterar sus propiedades externas, lo que implica suponer que dos partículas nunca ocuparán el mismo lugar, ya que, de ser así, ambas se excluirán a partir de la superficie exterior de cada una de ellas.

Además de esta impenetrabilidad, la corpuscularidad de la materia asume otra serie de propiedades que pueden clasificarse en propiedades primarias y secundarias. Las cualidades primarias remiten a aquellas cualidades inseparables de la misma idea de cuerpo. En primer lugar, podemos identificar la forma y el tamaño, ya que cualquier cuerpo finito asume ambas cualidades en relación con otro cuerpo finito; en segundo lugar, el movimiento y reposo de este con respecto a un punto de referencia. Cualquier otra propiedad distinta a las mencionadas anteriormente (forma, tamaño, movimiento, reposo e impenetrabilidad) es considerada como una cualidad secundaria, por ejemplo: el color, el olor, el sabor, así como cualquier otra propiedad fenoménica o subjetiva que despierte la misma polaridad. Las cualidades primarias sirven a su vez de punto de partida para describir, conjuntamente con las leyes del movimiento, las cualidades secundarias. Una cualidad secundaria como el calor se vuelve susceptible de ser descrita a partir de la interacción de una serie de *inputs* procedentes del entorno que inciden en nuestros órganos sensoriales. Por analogía, como fenómeno natural, el comportamiento del fuego puede describirse atendiendo a la violenta acción del movimiento de unas partículas corpusculares últimas que calentarán más o menos el cuerpo en virtud de su resistencia estructural al movimiento de estas partículas. La situación inversa resulta, por el contrario, imposible, ya que cualquier propiedad secundaria, como el calor, no permite la inferencia de la forma y el tamaño de un cuerpo cualquiera.

5.2.2. Dinámica y geometría corpuscular de la metáfora mecanicista

En segundo lugar, por universo se entiende también la totalidad de eventos pasados, presentes y futuros. Esta visión más dinámica y menos estática del universo se encuentra vinculada con las leyes que rigen el movimiento y comportamiento de la materia. El movimiento, entendido como la traslación de cualquier cuerpo desde la proximidad o lejanía de otros cuerpos considerados en reposo hasta otro cuerpo considerado también en reposo en relación al primero, se presupone como relativo, ya que lo que se mueve siempre lo hace respecto a un marco de referencia deliberadamente elegido. Asimismo, el movimiento —o reposo— de una partícula corpuscular no tendrá influencia alguna sobre su naturaleza o estado, ya que, al determinar arbitrariamente el marco de referencia, un mismo cuerpo puede estar moviéndose respecto de un sistema

de referencia e inmóvil o en reposo respecto de otro⁸⁶. Al mismo tiempo, estas las leyes que rigen el movimiento corpuscular se piensan como homogéneas, por lo que se intuye una presunta correspondencia entre el conjunto de leyes que rige el movimiento de los cuerpos en el dominio de la macrofísica y el que gobierna el comportamiento de las unidades últimas de la materia, es decir, del mundo microfísico. En otras palabras, una expresión algebraica que describa las trayectorias de dos partículas antes y después de una interacción debe aplicarse a cualquier cuerpo sin importar su forma o tamaño.

Es a partir de aquí que el mecanicismo comienza a construir una analogía entre las leyes que rigen la materia corpuscular y las de los cuerpos geométricos. En geometría, las propiedades que presentan cada una de las formas (del griego εἶδος, *eidos*) se deducen necesariamente a partir de la definición y de los axiomas del sistema. Por ejemplo, de la definición de la idea de círculo como región del plano delimitada por una circunferencia, se sigue que la distancia desde cualquier punto dentro del plano con respecto al centro será siempre menor o igual que su radio. El conocimiento de las leyes que rigen los cuerpos, sumado a la exactitud matemática con la que poder describirlas, permite predecir el comportamiento de dicho sistema; no obstante, la exactitud matemática que precisa la inexorabilidad de estas leyes incorpora una característica adicional, y es que estas deben resultar accesibles a la cognición humana.

La metáfora mecanicista permite la interpretación cognitiva de los resultados cuantitativos a partir de la imagen conceptual del funcionamiento del universo como el de una gran maquinaria de precisión matemática en la que, una vez conocidas las condiciones iniciales de un sistema, resulta posible predecir su comportamiento a partir de un conjunto de leyes. La precisión del lenguaje matemático a la hora de dar cuenta de estas leyes sumado a nuestra facultad para metaforizar una imagen del mundo, dotó a nuestra especie de una nueva ventana sensorial con la que acometer el estudio de la física de los cuerpos: el cálculo. Con el cálculo, las hipótesis científicas asumieron carta de naturaleza predictiva. La formulación matemática de las leyes físicas hizo posible la descripción cuantitativa de la física de los cuerpos a partir de un nuevo repositorio de conceptos que permitió que categorías primarias como el tamaño, la forma y el movimiento se volvieran susceptibles de ser estudiadas matemáticamente. Algunas categorías, como el tamaño y la forma, designan cualidades geométricas, y otras, como el movimiento, se interpretan como la traslación de un cuerpo de un lugar a otro, algo cuantificable mediante magnitudes espaciales.

Como consecuencia, el mecanicismo instauró una aproximación determinista al estudio del mundo, según la cual el estado de este en un momento dado obedece al resultado de un estado previo —o pasado— y condición necesaria de un estado posterior —o futuro—. Dado que son los corpúsculos materiales las entidades últimas responsables del comportamiento de los fenómenos naturales, el mecanicismo rechaza cualquier indicio de voluntarismo, sugiriendo que todos y cada uno de los fenómenos físicos responden a comportamientos mecánicos de la materia susceptibles de describirse a partir de las leyes del movimiento.

5.2.3. Principios metateóricos de la metáfora mecanicista

En la Grecia clásica imperaba la cosmología aristotélica, en la cual existían solo dos tipos de movimiento: el rectilíneo y el circular, el primer ejercido hacia el centro de la Tierra, y el segundo alrededor de esta. Esta doble interpretación del movimiento de los cuerpos se vio ampliada posteriormente gracias a los trabajos de Kepler que introdujeron la elipse y la parábola como tipos de movimiento asociados a los fenómenos físicos.

En su *Geometría*, Descartes ofrece un método para la resolución de determinados problemas geométricos presentando el álgebra como método resolutivo en esta ciencia. Interesado en proponer una doctrina filosófica alternativa a la física aristotélica, articula un sistema de pensamiento —un conjunto integrado de principios ontológicos, epistemológicos y metodológicos— fundamentado en una física matemática que permitiera la construcción de hipótesis sobre el comportamiento de los fenómenos naturales en estrecha analogía con el funcionamiento de una máquina. En su *Tratado de la luz*, Descartes apela al fuego como primer elemento:

Concibo el primer elemento —al que puede llamarse fuego— como el líquido más sutil y penetrante que hay en el mundo [...] [E] imagino que sus partes son mucho menores y se mueven mucho más deprisa que las de los otros cuerpos (Descartes 1989, pág. 85).

Como segundo, al aire:

Concibo también el segundo —al que puede tomarse por el elemento del aire— como un líquido muy sutil en comparación con el tercero, pero, comparándolo con el primero, es preciso atribuir a cada una de sus partes

⁸⁶ El movimiento definido como traslación constituye una propiedad geométrica de los corpúsculos materiales y, por consiguiente, se vuelve susceptible de expresarse en el mismo lenguaje en que se expresan las propiedades geométricas de los cuerpos, como la forma o el tamaño. Cf. Salvatico (2006).

algún tamaño y figura, e imaginarlas casi redondas y como granos de arena y polen cuando están juntas. De este modo, no se pueden disponer ni comprimir entre sí sin que queden siempre a su alrededor numerosos intervalos diminutos, en los que le es más fácil deslizarse al primer elemento que no a estas partes cambiar especialmente de figura para llenarlos (*Op. cit.*, pág. 87).

Y a la tierra como tercero:

Además de estos dos elementos sólo admito un tercero, a saber, el de la tierra, del que juzgo que sus partes son tanto mayores y se mueven tanto más despacio, en comparación a las del segundo, como éstas en comparación a las del primero. Asimismo, creo que es conveniente concebirlo como una o varias masas grandes cuyas partes tienen poco o incluso carecen de movimiento que les haga cambiar de situación en relación unas con otras (*Op. cit.*, pág. 87).

A partir de estos tres elementos, Descartes postula la existencia de tres tipos diferentes de corpúsculos materiales que, a su vez, componen el resto de entidades físicas, al mismo tiempo que apunta a la materialidad del mundo a partir de tres categorías: el tamaño, la forma y el movimiento, siendo estas las únicas determinaciones posibles en todos los corpúsculos materiales. De acuerdo a estas tres determinaciones, Descartes incorpora una serie de argumentos metafísicos sobre los que se fundamenta su identificación entre materia y extensión. En sus *Principios*, expone: «Aun cuando cualquier atributo baste para dar a conocer la substancia, sin embargo, cada substancia posee uno que constituye su naturaleza y su esencia y del cual dependen todos los otros. A saber, la extensión tridimensional constituye la naturaleza de la substancia corporal» (Descartes 2002, pág. 53). De este modo, la materia pasaría a concebirse como una entidad extendida en un espacio tridimensional y compuesta por pequeños corpúsculos en movimiento, cada uno de ellos de distinta forma según el tipo de materia que integran. Como consecuencia, se asume que ninguna de las partes últimas de las que está constituida la materia, por muy pequeña que esta sea, carece de la cualidad de extensión⁸⁷.

Tras postular la extensión como propiedad inherente a toda entidad material, Cartesius proyecta una serie de analogías mecánicas al universo en su totalidad, considerando este como una gran maquinaria: «Hasta ahora sólo he descrito esta Tierra y en general todo el mundo visible, tal y como si solamente fuese una máquina en la que nada hubiese que considerar sino las figuras y los movimientos de sus partes» (Descartes 2002, pág. 392). El problema de este planteamiento reside en su tercera ley del movimiento, según la cual «si un cuerpo en movimiento choca con otro más fuerte que él, no pierde nada de su movimiento; ahora bien, si encuentra otro más débil y que puede mover, pierde tanto movimiento como comunica al otro» (Descartes *Op. cit.*, pág. 101). De acuerdo a esta ley, en el caso de dos cuerpos, uno en movimiento y otro en reposo, tras el choque, el cuerpo más fuerte transferirá parte de su cantidad de movimiento al cuerpo más débil, algo que, si consideramos la resistencia al movimiento que presenta un cuerpo en reposo, incorpora una noción dinámica no deducible a partir de las determinaciones mecánicas de la materia cartesiana. Pese a ello, el mecanicismo cartesiano se proclamó como una alternativa metodológica al *Órganon* aristotélico al rechazar las cualidades reales y las formas substanciales, a las que contrapuso la inteligibilidad de la transferencia de movimiento entre cuerpos materiales.

Y podemos muy fácilmente concebir como el movimiento de un cuerpo puede ser causado por el movimiento de otro cuerpo y diversificado según la dimensión, la figura y la situación de sus partes, pero no podríamos entender en forma alguna cómo estas mismas cosas, a saber, la dimensión, la figura y el movimiento pueden producir naturalezas enteramente diferentes de la suya, tales como son las cualidades reales y las formas substanciales que la mayor parte de los Filósofos han supuesto en los cuerpos; tampoco podríamos comprender cómo estas cualidades o formas, estando en el interior de un cuerpo, pueden tener la fuerza para mover a otros (Descartes 2002, pág. 404).

Coetáneo a Descartes fue el filósofo y matemático toscano Galileo, quien implementó esta visión mecanicista del mundo a partir de la matematización de los fenómenos físicos. En 1634, a raíz de sus estudios de la estructura de la materia, Galileo llega a la conclusión de que los fenómenos de condensación y refracción no se muestran susceptibles de explicarse en términos de una filosofía atomista heredada, razón por la que decide introducir la idea de que el estado sólido de un cuerpo obedece a efectos producidos por el vacío entre corpúsculos. A diferencia de Aristóteles, para quien los cuerpos se precipitan a mayor velocidad que los livianos al dejarlos caer desde una determinada altura, Galileo postula que la aceleración de la gravedad es la misma sin importar el peso. Para ello, se vale de planos inclinados y dos esferas de distinto peso para estudiar en detalle el comportamiento de estas sobre los planos y verificar experimentalmente que, a pesar de la diferencia en el peso de ambas esferas, su comportamiento sobre los

⁸⁷ Ante la descripción que Descartes hace de la materia, la existencia del vacío, entendido este como un espacio donde no hay materia, no sería posible, a menos que se piense el universo como la totalidad de las relaciones que se dan entre las distintas formas de materia.

planos sería el mismo⁸⁸. La reflexión de Galileo acerca del movimiento de caídas de los cuerpos asume proporcionalidad entre la velocidad y el espacio. La reflexión de Galileo acerca del movimiento de caída de los cuerpos asume proporcionalidad entre la velocidad y el espacio, siendo la velocidad de un cuerpo en cualquier punto del recorrido igual a la suma de las velocidades instantáneas adquiridas hasta alcanzar un movimiento uniformemente acelerado (Koyré 1980). Este descubrimiento se consagró como corolario de uno de los mayores logros intelectuales de la época al someter al movimiento y, por consiguiente, al tiempo, a la ley del número entero.

Años después, Robert Boyle, recuperando los estudios realizados por Galileo y Descartes, impulsó una filosofía de corte mecanicista que, pese a reconocer la reductibilidad de los fenómenos naturales a interacciones mecánicas entre corpúsculos materiales, prestaba especial atención a las causas intermedias en la explicación de dichos fenómenos. Según Boyle, la materia que conforma los cuerpos es una y la misma, así lo expresa en *Origin of Forms and Qualities*: «Estoy de acuerdo con la mayoría de los filósofos sobre esto: hay una materia católica o universal que es común a todos los cuerpos —entendiendo por “materia” toda sustancia extendida, divisible e impenetrable⁸⁹» (Boyle 2017, pág. 10). Ante tal concepción de la materia, Boyle defiende que la diversidad en la naturaleza debe tener su origen en algo que, siendo distinto a ella, sea universal: el movimiento, al que sitúa como el causante de todos los fenómenos físicos.

Es cierto que el tamaño, la forma, el reposo y la textura tienen su papel en los fenómenos naturales, pero en comparación con el movimiento parecen ser en muchos casos efectos, y en otros muchos meras condiciones o requerimientos que tienen un efecto en cómo una porción de materia afecta a otra a partir de su movimiento⁹⁰ (*Op. cit.*, pág. 11).

Para ilustrar este planteamiento, Boyle se vale de la maquinaria interna de un reloj como metáfora del movimiento. La forma y disposición de cada uno de los componentes son determinantes para su funcionamiento, pero es el movimiento que realizan dichos componentes lo que permite que el mecanismo en su conjunto realice la función para la que fue diseñado. Del mismo modo, dado que toda la materia es una y la misma, toda la aparente diversidad que presentan los fenómenos naturales se origina a partir del movimiento de lo que Boyle denomina *minima naturalia*, es decir, corpúsculos materiales últimos que conforma la materia. Estos *minima naturalia* presentan unas cualidades primarias y otras secundarias. Entre las cualidades primarias, distingue el tamaño, la forma y el movimiento (o reposo), en contraposición a las cualidades secundarias, las cuales se originan según el modo en que las cualidades primarias inciden en nuestros órganos sensoriales. En palabras de Boyle:

Porque hay hombres en el mundo cuyos órganos de los sentidos están estructurados de maneras tan diferentes que un órgano está preparado para recibir impresiones de algunos objetos externos y otro para recibir ellos de otros. (Un cuerpo externo puede actuar sobre los sentidos como un cuerpo entero (tacto) o por transmisión de algunos corpúsculos (olor) o propagando algún movimiento a los órganos sensoriales (oído)). Los hombres les dan diferentes nombres a las percepciones de estas impresiones —“calor”, “color”, “sonido”, “gusto”, etc.— y la mayoría de los hombres se imaginan que estas provienen de ciertas cualidades distintas y particulares del objeto externo, cualidades que tienen cierta semejanza con las ideas. Su acción sobre los sentidos despierta en la mente. De hecho, sin embargo, todas estas cualidades sensibles... son meros efectos de las cualidades primarias antes mencionadas⁹¹ (Boyle 2017, pág. 30).

Con esta reflexión, Boyle defiende que la comprensión de la totalidad del mundo no se limita al conocimiento de la disposición y movimiento de los corpúsculos materiales, pues esta requiere la comprensión del mundo en su conjunto, ya que cada cuerpo constituido por sus propiedades mecánicas propias interactúa causalmente con los demás de acuerdo a un todo coherente. Esta visión mecanicista del mundo no se ve restringida a dominios parciales de la naturaleza, es decir, a las causas mecánicas que intervienen en el origen de un fenómeno determinado, ya que comprende una visión del funcionamiento del universo en su conjunto. Ahora bien, las leyes mecánicas que disponen el funcionamiento de la materia presentan, según Boyle, serias limitaciones a la hora de acometer causas finales, ya que el hombre se muestra incapaz de conocer con total certeza y en todo su alcance los designios divinos, sus intenciones y fines⁹².

Además de Boyle, otro autor que contribuyó consustancialmente a al desarrollo de la metáfora mecanicista fue el filósofo John Locke, quien además de ser un ferviente defensor del empirismo, adscribió

⁸⁸ Las diferencias entre las ideas de Aristóteles y las de Galileo se explican enclavando históricamente a ambos autores. En la época de Aristóteles, la verificación experimental no era *conditio sine qua non* para aceptar una idea, ya que esta se fundamentaba en criterios deductivos como la observación. En el periodo de Galileo, la formulación matemática y la verificación experimental, así como la constatación empírica, de un fenómeno eran necesarias para dar cuenta de la validez de una idea o teoría.

⁸⁹ La traducción es mía.

⁹⁰ La traducción es mía.

⁹¹ La traducción es mía.

⁹² Conviene leer a Boyle como un filósofo naturalista que buscaba comulgar de algún modo los principios mecánicos de la materia con una visión creacionista del mundo, así como la acción de Dios sobre el mismo.

su filosofía a la existencia de corpúsculos materiales que, según el autor, son imperceptibles. La filosofía mecanicista de Locke refuta, por un lado, la identificación cartesiana entre materia y extensión mientras que, por otro, rechaza toda posibilidad de alcanzar un conocimiento perfecto de los fenómenos naturales equiparable al que confiere la matemática.

Aquí me he atenido a la hipótesis corpuscular, como aquella que se supone que más penetra en una explicación inteligible de las cualidades de los cuerpos, y me temo que la flaqueza del entendimiento humano apenas podrá substituir esa explicación por otra que nos ofrezca un descubrimiento más completo y más claro de la conexión necesaria y de la coexistencia de las potencias que podemos observar unidas en varias clases de cuerpos (Locke 2005, pág. 614).

Al igual que sus predecesores, Locke atribuye a los corpúsculos materiales una serie de propiedades que denomina cualidades primarias, cuya existencia es real, más allá de que estas puedan ser o no percibidas por los sentidos. Entre estas cualidades primarias, Locke destaca «la solidez, la extensión, la forma, el movimiento, el reposo y el número» (*Op. cit.*, pág. 13).

Las cualidades [primarias] en los cuerpos son, primero, aquellas enteramente inseparables del cuerpo, cualquiera que sea el estado en que se encuentre, y tales que las conserva constantemente en todas las alteraciones y cambios que dicho cuerpo pueda sufrir a causa de la mayor fuerza que pueda ejercerse sobre él. Esas cualidades son tales que los sentidos constantemente las encuentran en cada partícula de materia con bulto suficiente para ser percibida, y tales que la mente las considera como inseparables de cada partícula de materia, aun cuando sean demasiado pequeñas para que nuestros sentidos puedan percibir las individualmente (*Op. cit.*, pág. 113).

Asimismo, Locke atribuye a los corpúsculos un conjunto de cualidades a las que denomina secundarias y a las que considera potencias que producen diversas sensaciones por medio de sus cualidades primarias, como son «los colores, sonidos, gustos, etc.» (*Op. cit.*, pág. 114). Estas cualidades secundarias no son propiedades intrínsecas de los cuerpos como sí lo son las cualidades primarias, ya que tienen su origen en las diferentes configuraciones de las cualidades primarias causando efectos particulares en nuestros sentidos. La filosofía corpuscular de Locke adopta una posición intuitiva en la medida en que asume que para alcanzar una ciencia perfecta de los cuerpos naturales, es preciso que se cumplan dos condiciones: la primera, conocer las cualidades primarias de los corpúsculos que conforman dicho cuerpo y, la segunda, determinar cómo estas producen las cualidades secundarias, es decir, el acto de percepción por parte del observador. Así lo expresa en su *Ensayo*: «No pongo en duda que, si pudiéramos descubrir la forma, el tamaño, la contextura y el movimiento de las partículas constitutivas de dos cuerpos cualesquiera, sabríamos, sin necesidad de pruebas, varias de las operaciones que podrían producir el uno respecto al otro» (*Op. cit.*, pág. 555).

Además de su clasificación de cualidades primarias y secundarias, al igual que Boyle, Locke se vale de la metáfora de la maquinaria interna de un reloj para ilustrar cómo se predisponen los diferentes elementos que constituyen el cuerpo de un animal:

¿Qué es un reloj? [...] Una organización o construcción de partes dispuestas adecuadamente para un cierto fin que sea capaz de ser realizado cuando se recibe el impulso de una fuerza suficiente. Si suponemos que esa máquina es un cuerpo continuo cuyas partes organizadas se reparan, aumentan o disminuyen por una constante adición o separación de partes no sensibles, en una vida común, tendremos algo muy semejante al cuerpo de un animal; pero con esta diferencia: que en un animal, la adecuación de la organización y el movimiento, en que la vida consiste, comienzan al mismo tiempo, pues el movimiento brota del interior; pero en las máquinas, como la fuerza procede del exterior, muchas veces está ausente cuando el órgano, sin embargo, está en orden y bien dispuesto para recibirla (*Op. cit.*, pág. 314).

Al igual que ocurre en el cuerpo de un animal, en el mundo físico todo se encuentra articulado, de modo que cuando adscribimos ciertas propiedades a ciertos cuerpos, muchas veces desatendemos la dependencia al entorno por parte de estos. Esto se aprecia aún más en el caso de aquellos cuerpos naturales que se encuentra estrechamente ligadas a su entorno y del que dependen directamente.

Es muy posible que las grandes partes y los engranajes [...] de esta prodigiosa estructura del universo, puedan guardar entre sí tal conexión y dependencia en sus influencias y en sus operaciones que, quizá, las cosas aquí en nuestra mansión mostrarían un aspecto muy diferente y dejarían de ser lo que son si una de las estrellas o cuerpos mayores, colocado a una distancia incomprensible para nosotros, dejara de existir o de moverse como lo hace. Una cosa es segura, y es que las cosas, por más absolutas y totales que parezcan en sí mismas, no son sino dependencias de otras partes de la naturaleza en aquellos que nosotros más advertimos en ellas. Sus cualidades observables, sus acciones, sus potencias dependen de algo que está fuera de ellas; y, en la naturaleza, no conocemos ninguna parte tan completa y perfecta que no deba el ser que tiene y sus excelencias a sus vecinos. Es preciso, pues, no limitar nuestros pensamientos sólo a lo superficial de cualquier cuerpo, sino que debemos mirar más allá, para comprender perfectamente las cualidades que están en él (*Op. cit.*, pág. 588).

De este modo, Locke extiende las operaciones corpusculares de los fenómenos particulares al funcionamiento del universo en su totalidad, intuyendo por analogía una inferencia ampliativa que permite generar hipótesis sobre el comportamiento corpuscular. Ahora bien, esta inferencia ampliativa no garantiza alcanzar una ciencia perfecta de los cuerpos, ya que, dadas nuestras limitaciones como agentes epistemológicos, solo es posible alcanzar unos ciertos conocimientos prácticos de raigambre probabilística. Esta es la razón por la que Locke recurre a la analogía como estrategia que participe en este tipo particular de inferencia:

La mejor guía en la realización de los experimentos racionales, y para la formulación de hipótesis, tiene también su uso y su influencia, puesto que un cauteloso raciocinio, que parte de la analogía, nos conduce frecuentemente hacia el descubrimiento de verdades y de producciones útiles, que de otro modo permanecerían ocultos (*Op. cit.*, pág. 671).

Tras las contribuciones de Galileo, Boyle y Locke, la escuela mecanicista se consolidó firmemente con los trabajos de Isaac Newton (1642 – 1727) y al nacimiento de las leyes que rigen la mecánica celeste, las cuales llevan su nombre. A diferencia de sus predecesores, las aportaciones de Newton facilitaron la incorporación de nuevas categorías bajo las cuales identificar y estudiar las propiedades esenciales que constituyen la materia. Retomando la herencia corpuscular legada por sus predecesores, Newton señala un conjunto de propiedades esenciales presentes en todos los cuerpos. Entre estas propiedades cabe destacar la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad, y la inercia. Así lo expone en sus *Principia*: «Las cualidades de los cuerpos que no admiten intensificación ni reducción, y que resultan pertenecer a todos los cuerpos dentro del campo de nuestros experimentos, deben considerarse cualidades universales de cualesquiera tipos de cuerpos» (Newton 1987, págs. 461-462). Además de asumir la existencia de partículas impenetrables e indivisibles, Newton considera la existencia de principios activos entre la materia, lo que se conocen como las leyes del movimiento. La primera de estas leyes, o ley de la inercia, afirma que «todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas» (*Op. cit.*, pág. 41). La segunda ley, también denominada ley fundamental de la dinámica, afirma que, si se aplica una fuerza a un cuerpo, este acelerará; es decir, «el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa, y se hace en la dirección de la línea recta en la que se imprime esa fuerza» (*Op. cit.*, pág. 41). La tercera ley, o principio de acción-reacción, establece que «para toda acción hay siempre una reacción opuesta e igual. Las acciones recíprocas de dos cuerpos entre sí son siempre iguales y dirigidas hacia partes contrarias» (*Op. cit.*, pág. 42). Estas tres leyes obedecen a los cánones del ideal de sistematización deductiva, ya que se construyen sobre un conjunto de definiciones, axiomas y teoremas deducidos de dichos axiomas⁹³.

Además de revolucionar las nociones elementales de la física de los cuerpos, las leyes de Newton supusieron una consolidación formal de la metáfora mecanicista al permitir interpretar el movimiento de los planetas en torno al Sol como un sistema de masas puntuales que interactúan según la ley del inverso al cuadrado.

5.3. Evolucionismo

La idea de la evolución recurre a la analogía orgánica no solo como modelo explicativo del propio devenir del hombre, sino de cada una de las más diversas áreas del comportamiento de las sociedades. En su sentido amplio, el evolucionismo se proclama como una teoría biológica que asume el desarrollo progresivo del mundo físico, los organismos vivos, la cultura y la sociedad.

En 1857, Herbert Spencer, en su artículo *El progreso*, recupera algunas generalizaciones de la ley del desarrollo embriológico de Karl M. Baer, según la cual todas las estructuras biológicas se configuran desde una simple e indiferenciada homogeneidad a una compleja y diferenciada heterogeneidad mediante un proceso de mayor integración de las partes diferenciadas.

Manifiesto que esta comunidad de resultados implica causalidad. Puede ser que no se pueda dar cuenta de tal causalidad, más allá de que lo incognoscible se nos manifieste de esta manera. O puede ser que el modo de manifestarse se pueda reducir a otros más simples, de los cuales se desprenden estas consecuencias complejas. La analogía sugiere la última inferencia. En la actualidad, la conclusión de que todo tipo de evolución es desde un estado de homogeneidad incoherente indefinida a un estado de heterogeneidad coherente definida, se encuentra en la misma posición que la última conclusión definitiva de que todo tipo de cuerpo se descompone al morir. Y como para los diversos tipos de descomposición a través de los cuales pasan los productos animales y vegetales, no hemos descubierto un fundamento en las afinidades químicas de sus

⁹³ Véase Anexo IV.

elementos constituyentes; así, posiblemente, esta transformación universal de lo simple en lo complejo puede estar afiliada a ciertos principios primordiales simples⁹⁴ (Spencer 1865, pág. 219).

Esta idea no solo es aplicable a los organismos vivos, sino que puede extenderse al cosmos en su totalidad y, por consiguiente, a la organización social y humana:

La metamorfosis de un insecto solo se admite por analogía dentro del alcance de la palabra, tal y como se acepta popularmente; sin embargo, considerada en sí misma, [la metamorfosis] no es diferente a los cambios que constituyen la civilización⁹⁵ (*Op. cit.*, pág. 147).

A partir de su analogía orgánica, Spencer identifica el comportamiento de la sociedad como si de un organismo vivo se trataran a partir de una serie de correspondencias:

- Las sociedades y los organismos se diferencian de la materia inorgánica por un crecimiento visible.
- Así como las sociedades y los organismos crecen en tamaño, también lo hacen en complejidad.
- Tanto en una sociedad como en un organismo, la diferenciación progresiva en su estructura se ve acompañada de una diferenciación progresiva en sus funciones, cada vez más sofisticadas.
- La evolución crea para las sociedades, así como para los organismos, diferencias de estructura y función.
- Al igual que un organismo puede describirse como un sistema complejo integrado por otros más simples, una sociedad puede entenderse como un conjunto de agregados individuales.

La analogía orgánica dio paso a una metáfora orgánica —o evolucionista— que sugiere el progresivo proceso de diferenciación y crecimiento en complejidad que tiene lugar tanto en los seres vivos como en el seno de una sociedad. Para Spencer, toda estructura y función obedecen a un propósito determinado: «La evolución es una integración de la materia y la concomitante disipación de movimiento, durante la cual la materia pasa de una incoherente e indefinida homogeneidad a una definida heterogeneidad coherente⁹⁶» (Spencer 1865, pág. 446). En este sentido, la evolución, tanto en organismos vivos como en sistemas sociales, no solo se percibe como un fenómeno lineal y progresivo, sino que excluye toda idea de potencialidad, ya que esta se rige conforme a esquemas teleológicos predeterminados. En palabras de Spencer: «Solo a medida que las sociedades crecen, las artes se multiplican, las experiencias se acumulan y las relaciones constantes de los fenómenos se reconocen, se registran y se vuelven familiares, se hace posible la noción de explicación natural⁹⁷» (Spencer 1898, pág. 225).

La premisa de continuidad entre los procesos biológicos y el desarrollo de una sociedad se manifiesta lingüísticamente bajo la metáfora: «La sociedad es un organismo⁹⁸» (Spencer 1898, pág. 449). Al igual que los cristales crecen por acreción; es decir, por el apilamiento de moléculas y átomos sobre la superficie de sus caras, las sociedades, según crecen, van conformando estructuras cada vez más complejas y diferenciadas. Esta diferenciación progresiva en la complejidad que presenta una sociedad va acompañada, al mismo tiempo, de una diferenciación progresiva de funciones que también se percibe en los organismos vivos.

Coetáneo a Spencer, Charles R. Darwin, en su intento por explicar la reproducción diferencial de los fenotipos de una población biológica, y preservando la analogía orgánica, incorpora a la idea de evolución el concepto de selección natural. A diferencia de Spencer, para quien la evolución obedece a una fuerza intrínseca, invisible, que crea la diversidad, Darwin apela a las modificaciones espontáneas y a la variación al azar a partir de una tesis fundamental: *A mayor tamaño de población y mayor extensión de tiempo, mayor probabilidad de aparición de alteraciones ventajosas.*

Un gran número de individuos, por aumentar las probabilidades de la aparición de variedades ventajosas en un periodo dado, compensará una variabilidad menor en cada individuo, y, es, a mi parecer, un elemento importantísimo de éxito (Darwin 1921, pág. 98).

[...]

⁹⁴ La traducción es mía.

⁹⁵ La traducción es mía.

⁹⁶ La traducción es mía.

⁹⁷ La traducción es mía.

⁹⁸ La traducción es mía. En *Principios de sociología*, Spencer emplea esta metáfora como título de uno de los capítulos: «A society is an organism» (Spencer 1898, págs. 449 y ss.).

El transcurso del tiempo es sólo importante [...] en cuanto que da mayores probabilidades de que aparezcan variaciones ventajosas y de que sea seleccionadas, acumuladas y fijadas. El transcurso del tiempo contribuye también a aumentar la acción directa de las condiciones físicas de vida en relación con la constitución de cada organismo (*Op. cit.*, pág. 101).

[...]

Si en condiciones variables de vida los seres orgánicos presentan diferencias individuales en casi todas las partes de su estructura —y esto es indiscutible— [...], sería un hecho el más extraordinario que no se hubiesen presentado nunca variaciones útiles a la prosperidad de cada ser, del mismo modo que se han presentado tantas variaciones útiles al hombre (*Op. cit.*, pág. 126).

Aun sin saber cómo podían generarse, y menos aún heredarse, Darwin sugiere que la variación se origina, dada su complejidad, de modo multidireccional, impredecible e indeterminable, o, lo que es lo mismo, de un modo azaroso. Esta propuesta descartaba todo presunto determinismo en la naturaleza a la vez que rechazaba toda tendencia teleológica de la evolución hacia una predeterminada perfección, encarnada en su máxima expresión por el ser humano. Esta naturaleza teleológica aparece en la funcionalidad de todas las estructuras biológicas, donde estructura y función pueden, al mismo tiempo, considerarse como las visiones diacrónicas y sincrónicas de los organismos.

Quizá, en el fondo, la mejor prueba de la complejidad que esconde la metáfora orgánica sea el hecho de que a lo largo de la historia se haya recurrido a diferentes metáforas para formularla, la mayoría de ellas relacionadas con los conceptos de selección y causalidad. En este sentido, y pese a haber sido fuertemente criticada por su organicismo y linealidad, el punto más remarcable de la metáfora evolucionista reside en su esfuerzo por extender la idea de evolución a todas las esferas de desarrollo, considerando que el devenir de una sociedad se encuentra ligado a los mismos procesos naturales que afectan al resto de los seres vivos.

6. Metáfora y física

El ser humano ha llegado a las playas de lo desconocido y se ha encontrado con unas huellas... las suyas.

ARTHUR S. EDDINGTON

En su célebre artículo *Tiempo, espacio y gravedad*, Einstein expone lo siguiente:

La teoría de la relatividad es una teoría de principios. Para entenderla, se deben comprender los principios sobre los cuales descansa. Pero, antes de enunciar cuáles son estos principios, es necesario señalar que la teoría de la relatividad es como una casa con dos pisos separados: la teoría especial de la relatividad y la teoría general de la relatividad⁹⁹ (Einstein 1920, pág. 8).

Según el autor, una teoría de principios es aquella en la que, partiendo de las propiedades físicas, se establece el basamento teórico a partir del cual se deduce posteriormente una formulación matemática. En el caso de la teoría especial de la relatividad, esta se consolida sobre dos principios fundamentales. El primer principio asume el carácter constante de la velocidad de la luz en el vacío, mientras que el segundo apela a que «toda ley de la naturaleza que sea válida con respecto a un sistema de coordenadas K , también debe ser válida para cualquier otro sistema K' siempre que K y K' estén en movimiento uniforme de traslación¹⁰⁰» (*Op. cit.*, págs. 8-9). Según este segundo principio, todos los sistemas de coordenadas que sirvan como referencia para establecer predicciones sobre un fenómeno físico han de ser siempre equivalentes. Resulta comprensible, ya que las leyes físicas son independientes del sistema de referencia utilizado para realizar la medición, ya esté este en reposo o en movimiento. Ambos principios —la velocidad constante de la luz y la covariancia de las leyes físicas— impulsaron un cambio de perspectiva relativo a las leyes físicas que rigen el tiempo y el espacio, incompatibles con la experiencia intuitiva que se tenía de ambas nociones. Por ejemplo, en mecánica clásica, la noción de simultaneidad indica la coincidencia en el tiempo de dos sucesos diferentes con independencia del sistema de referencia adoptado; sin embargo, en mecánica relativista, la simultaneidad depende estrechamente del sistema de referencia a partir del cual se observan ambos sucesos. Dicho de otro modo, dos sucesos que se aprecian como simultáneos en mecánica clásica dejan de serlo en mecánica relativista. Lo mismo ocurre con los conceptos de masa y tiempo, siendo los resultados análogos

⁹⁹ La traducción es mía.

¹⁰⁰ La traducción es mía.

cuando se aplican los principios relativistas a ambos conceptos, ya que sus magnitudes físicas dependerán de su estado de movimiento con respecto al sistema de referencia desde el que se realiza la medición.

Tras postular su teoría especial de la relatividad, Einstein recurre a su principio de covariancia y lo extrapola a su teoría de la relatividad general. Para ello, Einstein admite una equivalencia entre la masa inercial y la masa gravitatoria. Según la mecánica clásica, la masa inercial se origina en el movimiento rotacional de los cuerpos mientras que la masa gravitatoria tiene su origen en las propiedades gravitatorias de la materia. Einstein prescinde de la interpretación clásica y observa ambas masas —inercial y gravitatoria— como iguales a efectos mesurables. En el caso del descenso de un cuerpo sometido a un campo gravitatorio, la segunda ley del movimiento de Newton establece que: $\vec{F} = ma$. Por otra parte, la fuerza de gravedad de terrestre se representa matemáticamente como: $\vec{F}_g = \vec{g}m$. Al medir la aceleración de caída a , el valor obtenido coincide con la intensidad del campo gravitatorio \vec{g} , lo que convierte a la masa inercial y a la masa gravitatoria en equivalentes. Una vez admitida la equivalencia entre ambas nociones, Einstein se propone adecuar las leyes de Newton a las nuevas leyes relativistas. Una de las consecuencias de esta adecuación fue la incompatibilidad de las leyes relativistas con la geometría euclídea, por lo que fue necesario la construcción de una nueva geometría que respondiera a las demandas de las formulaciones físicas relativistas. Esta nueva imagen del universo que nace de las tesis relativistas obedece en última instancia a una representación simbólica construida sobre una geometría no euclídea. La mecánica relativista de Einstein modifica la métrica del espacio y el tiempo y presentan una imagen del universo como un *continuum* espacio-tiempo con una nueva geometría cuyos principios se ven sometidos a la propia formulación teórica. Es más, a partir de la adopción de este nuevo principio de equivalencia, la geometría deja de ser una ciencia auxiliar, ajena a la experimentación y a los fenómenos físicos, y pasa a convertirse en el modo en que acometer el estudio de los fenómenos físicos. En consecuencia, la imagen del universo que se infiere de la mecánica relativista no es la misma que la que proporciona la mecánica clásica, ya que abraza una estructura conceptual más compleja, ajena por completo a nuestra intuición y captación sensible del mundo, una imagen que, tal y como hemos visto, no hubiera sido posible sin un profundo ejercicio analógico y metafórico de fondo.

6.1. Teoría de cuerdas

La cada vez más compleja formulación matemática del mundo ha desplazado progresivamente a la ciencia del ámbito de la experimentación y la ha acercado a un terreno de creciente especulación. A la luz de esta situación, cada vez son más las teorías que buscan dar cuenta de enigmáticas y pretendidas nuevas realidades, en ocasiones, con poco respaldo empírico. Una de estas teorías es la llamada teoría de cuerdas.

En 1968, Gabriel Veneziano ideó una fórmula matemática con la que describir la probabilidad de un suceso en función del ángulo que formaban dos partículas después de su colisión. Unos años después, en 1970, algunos miembros de la comunidad científica interpretaron tales resultados cuantitativos valiéndose de la imagen de una cuerda o filamento en lugar de la de una partícula. Esta nueva imagen de una cuerda longitudinal permitía la unión con otra por un extremo, dando lugar a una tercera cuerda; o bien, por sus dos extremos, cerrándose en sí misma; o bien, habiendo dos cuerdas cerradas y separadas, uniéndose cada una por uno de sus extremos y dando lugar una nueva cuerda cerrada de mayor longitud. En su formulación matemática, a esta imagen del mundo se le asignaron un conjunto de valores numéricos —o parámetros— y se estipuló que sus interacciones estuvieran regidas por dos constantes fundamentales: la primera, la denominada tensión de cuerda, que describe la cantidad de energía por unidad de longitud asociada a la cuerda; la segunda, la constante de acoplamiento, que indica la probabilidad de que una cuerda se rompa y de lugar a dos cuerdas.

Las ulteriores interpretaciones de esta especulación supusieron el inicio de lo que hoy se conoce como teoría de cuerdas, una propuesta teórica que asume que las partículas materiales aparentemente puntuales son estados vibracionales de un objeto unidimensional más básico al que se le da el nombre de cuerda y al que se asocian una serie de propiedades físicas que permiten establecer predicciones matemáticas sobre el comportamiento de las partículas elementales y sus interacciones. Esta imagen curvilínea de la cuerda, si bien no asume hasta la fecha existencia real, pues se limita a ser fruto de una especulación teórica, sí facilita la formulación matemática de la estructura presuntamente última de la materia gracias a una aproximación metafórica al estudio de la realidad subatómica.

6.2. Mecánica cuántica y el bosón de Higgs

Hagamos uso una vez más de nuestra metáfora paradigmática: *Un átomo es un sistema solar en miniatura*. Esta metáfora preserva la disposición geométrica de las partículas atómicas equiparando el

núcleo con el Sol, ambos como puntos de masas central; sin embargo, al equiparar la disposición energética en ambos dominios, la metáfora planetaria del átomo sufre serias limitaciones. La conocida como dualidad onda-corpúsculo introduce una dicotomía paradójica a la hora de establecer una analogía con el modelo planetario, ya que la presunta doble identidad que asumen las partículas subatómicas se muestra incompatible con nuestra experiencia del mundo macrofísico. En palabras de Bohr:

Según esta idea, la mayor parte de la masa atómica está concentrada en un núcleo, de carga positiva, cuyas dimensiones son muy pequeñas comparadas con las del átomo. Alrededor de este núcleo se mueven un cierto número de electrones, de masa mucho menor y carga negativa. De esta manera, el problema de la estructura atómica toma un aspecto parecido a los problemas de la mecánica celeste. Sin embargo, un examen más detallado revela de inmediato que existe una diferencia fundamental entre un átomo y un sistema planetario (Bohr 1988, pág. 77).

La aparición de la mecánica cuántica, y con ella su irrefrenable intento por desentrañar el comportamiento de la estructura última de la materia, reveló una imagen de la realidad subatómica un tanto paradójica, la conocida dualidad onda-corpúsculo. Con el fin de salvar esta imagen del mundo cuántico, Bohr propuso su conocido principio de complementariedad, según el cual dos propiedades complementarias no pueden medirse simultáneamente con total precisión. En otras palabras, la descripción completa de un fenómeno se consigue a través de una superposición de dos o más descripciones parciales.

La misma naturaleza de la teoría cuántica nos fuerza a considerar la coordinación espacio-temporal y la expresión de la causalidad, cuya unión caracteriza a la teoría clásica, como características complementarias pero excluyentes de la descripción, simbolizando, respectivamente, la idealización de la observación y la definición (Bohr, cit. Holton 1982, pág. 122).

Este principio de complementariedad no asume una significación literal, ya que implica contradecir la lógica común. El desafío de conciliar ambas imágenes antitéticas —onda y corpúsculo— de una misma entidad física consiste en asumir dos estructuras distintas e incompatibles entre sí para la materia subatómica. En una primera aproximación, salvar ambas estructuras parece una ardua tarea, mas no lo es tanto si dichas ondas y corpúsculos se interpretan como idealizaciones simbólicas; es decir, como metáforas construidas teóricamente.

En 1960, con motivo de superar el problema de la dualidad onda-corpúsculo, se propuso una solución que consistía en asumir una ruptura de la simetría. Dos años más tarde, en 1962, surgió una nueva propuesta de la mano de François Englert y Robert Brout, y unos meses más tarde esta misma idea fue expuesta de un modo independiente por Peter Higgs. Esta nueva propuesta que combinaba la ruptura espontánea de la simetría con la teoría de campo de gauge llevaría a predecir la existencia de una nueva partícula originada como consecuencia de esta ruptura: el bosón de Higgs¹⁰¹. El bosón de Higgs se define como un campo asociado a una partícula, resultado de la colisión de dos protones acelerados. Esta partícula surge como una entidad teórica que responde a la construcción ficticia idealizada. En el caso del bosón de Higgs, las alteraciones presentes en el campo deberían ser consideradas descripciones metafóricas posibles gracias a la naturaleza simbólica del lenguaje matemático, cuyo significado es susceptible de adaptarse a nuevos enfoques teóricos.

Dada la complejidad de algunas entidades y fenómenos naturales —como es el caso del bosón de Higgs—, la ciencia se vale de un lenguaje simbólico que permite capturar intelectualmente algunos rasgos característicos a partir de descripciones metafóricas que, tal y como hemos visto, permiten captar mediante imágenes asociadas algunas de las propiedades inferidas en dichas entidades y fenómenos. Este lenguaje simbólico es inseparable de la teoría y es el que permite la asignación de significado, tanto físico como matemático, a valores numéricos y el que proporciona una trama formal coherente con la que predecir resultados verificables por vía experimental.

7. CONCLUSIONES

Como pilares moduladores del lenguaje y el pensamiento, la analogía y la metáfora conectan el mundo físico con su formalización simbólica mediante bellas relaciones. Ambas estrategias —analogía y metáfora—, siendo la segunda la máxima expresión de la primera, operan como la piedra angular en torno a la cual se articula el resto de la investigación científica, dotando de estructura inferencial la realidad y facilitando la formulación matemática del pensamiento humano en el marco metodológico y epistemológico de la ciencia.

¹⁰¹ A la hipótesis del bosón de Higgs se han sumado otras propuestas, entre las que cabe destacar las aportadas por Steven Weinberg y Abdus Salam, que elevan la partícula a la categoría de campo, siendo la partícula del bosón de Higgs la manifestación corpuscular de dicho campo.

CONCLUSIONES GENERALES

En el primer capítulo de este trabajo, he sentado las bases del constructivismo como una factible filosofía de la ciencia, según la cual el conocimiento científico, no se adquiere objetivamente de forma pasiva, sino que se construye subjetivamente de forma activa como resultado de un modo particular de situarse frente a la experiencia. Si asumimos que el cerebro es un sistema funcionalmente cerrado y autorreferencial, la idea de que este pueda adquirir algún tipo de conocimiento relativo al mundo físico se fundamenta, en primer lugar, en la presencia innata de un conjunto de reglas de funcionamiento y, en segundo, en los principios de organización desarrollados durante un largo proceso de aprendizaje intuitivo-experiencial con el entorno. A partir de los estímulos de control que operan sobre ciertos principios de organización, la cognición requiere de la propia experiencia, gracias a la cual, y apoyada esta última en la facultad de la memoria, podemos trabajar con hipótesis y advertir y repetir ciertas experiencias conforme a una serie de patrones imaginativos.

Al pensar la ciencia como una extensión de nuestra apertura cognitiva al mundo, el constructivismo considera la ciencia y la cognición como dos sistemas entrelazados que se activan mutuamente y se modulan entre sí a través de un lazo interno de retroalimentación, lazo que opera mediante la dinámica interna y la dinámica del desarrollo teórico, respectivamente. Cada uno de estos dos dominios —ciencia y cognición— buscan generar un marco de interacción adecuado que garantice, en el caso de la ciencia, la viabilidad predictiva por parte de los modelos utilizados en la investigación y, en el caso de la cognición, una amplia gama de estrategias funcionalmente exitosas con las que interactuar con el entorno. El constructivismo adopta esta noción de viabilidad predictiva, o ajuste funcional, como fundamental en la correcta aproximación al estudio tanto de la cognición como de los modelos en ciencia, ya que, al igual que ocurre con los procesos y estructuras que integran la arquitectura cognitiva de cualquier sistema de observación, los modelos se encuentran limitados por su estructura teórico-matemática, así como por su radio de aplicabilidad. Ante esta premisa, la defensa del constructivismo como una factible filosofía de la ciencia conduce a una defensa de la viabilidad predictiva de un modelo, o lo que es lo mismo, de su ajuste funcional, frente a la idea de que este sirva como una fiel descripción de la realidad estudiada.

Este ha sido el cometido del segundo capítulo de este trabajo, en el que he examinado algunos de los problemas más paradigmáticos relativos a la naturaleza de los modelos en la investigación científica, como el problema de la inconmensurabilidad, los casos límite y la incompatibilidad interteórica. Para ello, he contrastado, primero, los postulados del Modelo Mecanicista de Newton [MMN] y del Modelo Relativista de Einstein [MRE], y segundo, los del Modelo Nuclear de Gota Líquida [MNGL] y del Modelo Nuclear de Capas [MNC], y así mostrar cómo, pese a la imposibilidad de señalar ningún como una fiel descripción de la parcela de realidad estudiada, dada la incompatibilidad presente entre sus postulados fundamentales y la imagen del mundo sobre la que se asientan, cada modelo resulta predictivamente exitoso por separado dentro de su dominio de aplicabilidad. En primer lugar, me he situado en el dominio de la macrofísica para así mostrar como el MMN se adaptó durante más de dos siglos a un mundo concebido a imagen y semejanza de una gran maquinaria regida por las leyes que enlazan causa y efecto y susceptible de ser estudiado en términos de materia y movimiento. Pero con el paso del tiempo, los nuevos descubrimientos y observaciones astronómicas, como el avance del perihelio de Mercurio, la desviación de la luz o el corrimiento gravitacional al rojo, pusieron en tela de juicio la presunta universalidad de la que gozaba el MMN, sobre todo a la hora de dar cuenta de fenómenos originados en campos gravitatorios de alta intensidad o en velocidades cercanas a la de la luz. A diferencia del MMN, el MRE permitía estudiar con alto grado de precisión estos nuevos fenómenos, ya que este, al erigirse sobre una imagen del mundo muy distinta, el espacio y el tiempo dejan de proporcionar un fondo fijo y absoluto, y la fuerza, como explicación de los fenómenos gravitacionales, pasa a describirse en términos geométricos debido a la presencia de cuerpos masivos.

Asimismo, tras contrastar los postulados del MMN y del MRE, he mostrado como este mismo hecho se manifiesta en el dominio de la microfísica a la hora de comparar diferentes modelos nucleares, como MNGL y el MNC, que se erigen sobre una imagen del núcleo atómico muy distinta. Ahora bien, pese a basarse en diferentes concepciones acerca de la naturaleza subatómica, ambos modelos permiten, al igual que ocurre en macrofísica con el MMN y el MRE, salvar por separado diferentes fenómenos originados a nivel subatómico: mientras que el MNGL permite salvar la estabilidad de los nucleones y predecir su energía de unión, el MNC salva la existencia de los denominados números mágicos y ofrece resultados cuantitativos que coinciden con alto grado de precisión con los valores experimentales de propiedades como el espín, el momento dipolar magnético y el momento eléctrico cuadripolar.

La incompatibilidad interteórica entre modelos mutuamente incompatibles, tanto a nivel macrofísico como microfísico, pero predictivamente exitosos por separado a la hora de estudiar con alto grado de precisión diferentes fenómenos, hace del constructivismo una filosofía de la ciencia idónea con la

que acometer el estudio de la modelización, ya que, al desestimar toda presunta relación de correspondencia real en términos de semejanza, verosimilitud o isomorfismo entre un modelo y la realidad, esta filosofía reinterpreta el conocimiento como una ordenación de campos cada vez más amplios de experiencia, o lo que es lo mismo, como la articulación de un conjunto de estrategias funcionalmente exitosas que faciliten la manipulación y el control predictivo del mundo mediante su modelización. Esta es la razón de la existencia de modelos mutuamente incompatibles a la vez que competidores entre sí por dar cuenta de un aspecto de la realidad desde diferentes concepciones de la misma, un hecho recurrente en la historia de la ciencia.

La puesta en interacción de los mecanicismos que rigen la cognición humana y los que intervienen en la actividad científica hacen del constructivismo una filosofía de la ciencia idónea con la que estudiar las reglas de funcionamiento y principios de organización de la experiencia que operan tanto a nivel cognitivo como científico. De entre todas estas reglas y principios, la analogía y la metáfora asumen especial importancia dado el papel clave que ambas estrategias asumen durante la fase de modelización. El reexamen de ambas estrategias desde una posición constructivista de la ciencia, tal y como se ha venido desarrollando hasta ahora, ha sido el propósito del tercer capítulo de este trabajo. Como estrategias inherentes a nuestro modo de pensar la realidad, la analogía y la metáfora permiten conectar el mundo físico con su formalización simbólica a partir de bellas relaciones. A lo largo de la historia, muchos han sido los casos de analogías que han favorecido notablemente el desarrollo teórico de la ciencia. Como ejemplo de ello, he examinado algunas de las analogías de las que se valió Einstein para desarrollar su teoría de la relatividad, como las analogías entre un campo gravitatorio y un marco de referencia acelerado, entre las leyes de la mecánica y las leyes de la física en su conjunto o entre marcos de referencia en rotación y geometrías bidimensionales no euclídeas. Asimismo, en lo que respecta a la metáfora, al operar sobre un basamento analógico, esta estrategia permite dotar de estructura verbal el pensamiento analógico a partir de un conjunto de rasgos deliberadamente asociados entre diferentes dominios de experiencia, tal y como ocurre a la hora de hablar de fluido electromagnético, línea de corriente o cuerda elástica, donde la metáfora facilita el discurso de la razón al descansar sobre imágenes que en ningún caso constituyen una descripción literal de cómo es la física del mundo, sino un nuevo escenario conceptual donde un nuevo dominio de experiencia se vuelve comprensible gracias a una aproximación metafórica. Es innegable que el potencial epistémico de ambas estrategias —analogía y metáfora— se hace patente en la investigación científica, brindando una nueva aproximación al estudio de la modelización donde carece de sentido hablar de analogías y metáforas verdaderas o falsas —así como de modelos verdaderos o falsos, o aproximadamente verdaderos o aproximadamente falsos—, sino de diferentes perspectivas a partir de las cuales el científico interpreta la realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO I: CONSTRUCTIVISMO: BREVE ANÁLISIS DOXOGRÁFICO DE SU DESARROLLO HISTÓRICO

- ARISTÓTELES. *Política*. Gredos: Madrid, 1988a.
— *Acerca del alma*. Gredos: Madrid, 1988b.
- BERKELEY, G. *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*, en D. R. Wilkins (Ed.). Jacob Tomson: London, 2002.
- BERNABÉ, A. *Fragmentos presocráticos: de Tales a Demócrito*. Alianza: Madrid, 2001.
- BRUNSWIK, E. *The conceptual framework of psychology*. Chicago University Press: Chicago, 1952.
— «Ratiomorphic models of perception and thinking», *Acta Psychologica*, 11, 1955, págs. 108–109.
- CAMPBELL, D. T. «Evolutionary Epistemology», en P. A. Schilpp (Ed.), *The Philosophy of Karl R. Popper*, LaSalle, IL, Open Court, 1974, págs. 412-463.
- DESCARTES, R. *Reglas para la dirección del espíritu*, en *Descartes*. Gredos: Madrid, 2011a.
— *Meditaciones metafísicas*, en *Descartes*. Gredos: Madrid, 2011b.
— *Discurso del método*, en *Descartes*. Gredos: Madrid, 2011c.
- FOERSTER, H. VON. «Construyendo una realidad», en P. Watzlawick (Ed.), *La realidad inventada*, Gedisa: Barcelona, 1981, págs. 38-56.
— *Sicht und Einsicht*. Vieweg & Sohn: Braunschweig/ Wiesbaden, 1985.
— *Las semillas de la cibernética*, en M. Pakman (Ed.). Gedisa: Barcelona, 1991.
— *Sistémica elemental. Desde un punto de vista superior*. Fondo Editorial: Colombia, 1997.
— *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*. Springer-Verlag: New York, 2003.
- FOWLES, J. *El Mago*. Anagrama: Madrid, 2015.
- GLASERSFELD, E. VON. «Introducción al constructivismo radical», en P. Watzlawick (Ed.), *La realidad inventada*, Gedisa: Barcelona, 1981, págs. 20-37.
— *Radical Constructivism: A Way of Knowing and Learning*. Routledge Falmer: London, 1995.
- HAECKEL, E. *Die Welträtsel: Gemeinverständliche Studien über monistische Philosophie*. Hoffenberg: Berlin, 2016.
- HESSE, H. *El lobo estepario*. Libresa: Quito, 1990.
- HEYLIGHEN, F. & JOSLYN, C. «Cybernetics and Second-Order Cybernetics», en R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science & Technology* (3ª ed.). Academic Press: New York, 2001.
- HOLMES, J. *The American Biblical Repository, Vol. IX, Nos. XVII, XVIII*. E. Littell: New York, 1843.
- IBRAHIM, A. S. «Saudi Arabia», en D. B. Baker (Ed.), *The Oxford Handbook of the History of Psychology: Global perspectives*. Oxford University Press: Oxford, 2012.
- KANT, E. *Crítica de la razón pura*. Alfaguara: Madrid, 1997.
— *Prolegómenos a toda metafísica futura que haya de poder presentarse como ciencia*. Istmo: Madrid, 1999.
— *La metafísica de las costumbres*. Tecnos: Madrid, 2008.
- LOCKE, J. *Ensayo sobre el entendimiento humano*. Fondo de Cultura Económica: México, 2005.
- LORENZ, K. «Methods of approach to the problem of behavior», *Studies of animal and human behavior*, Vol. 2, Harvard University Press: Cambridge, 1971a, págs. 246–280.
— «Gestalt perception as a source of scientific knowledge», *Studies in animal and human behavior*, Vol. 2, Harvard University Press: Cambridge, 1971b, págs. 281–322.
— *The foundations of ethology*. Springer Verlag: New York, 1981.
— «Kant's Doctrine of the A Priori in the Light of Contemporary Biology», en M. Ruse (Ed.), *Philosophy After Darwin: Classic and Contemporary Readings*. Princeton University Press: Princeton, 2009, págs. 231–247.
- MALEBRANCHE, N. *The Search after the Truth*, en T. M. Lennon & P. J. Olscamp (Eds.). Cambridge University Press: Cambridge, 1980.
- MARC, E. & PICARD, D. *La interacción social. Cultura, instituciones y comunicación*. Paidós: Barcelona, 1992.
- MATURANA, H. *Desde la biología a la psicología*. Editorial Universitaria: Chile, 2006.
— & VARELA, F. *De máquinas y seres vivos*. Lumen: Buenos Aires, 1994.

- PIAGET, J. *Introducción a la epistemología genética*. Paidós: Buenos Aires, 1978.
- *La construcción de lo real en el niño*. Nueva Visión: Buenos Aires, 1979.
- *La equilibración de las estructuras cognitivas*. Siglo XXI Editores: México, 1998.
- *La psicología de la inteligencia*. Crítica: Barcelona, 1999.
- POERKSEN, B. *The Certainty of Uncertainty: Dialogues Introducing Constructivism*. Imprint Academic: Charlottesville, 2001.
- POPPER, K. *El mundo de Parménides. Ensayos sobre la ilustración presocrática*. Paidós: Barcelona, 1998.
- ROTH, G. «Selbstorganisation – Selbsterhaltung – Selbstreferentialität: Prinzipien der Organisation der Lebewesen und ihre Folgen für die Beziehung zwischen Organismus und Umwelt», en A. Dress et al. (Eds.), *Selbstorganisation. Die Entstehung von Ordnung in Natur und Gesellschaft*. München, 1986, págs. 149-180.
- «Erkenntnis und Realität: Das reale Gehirn und seine Wirklichkeit», en S. J. Schmidt (Ed.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Suhrkamp, 1987, págs. 229-255.
- *Aus Sicht des Gehirns*. Suhrkamp, 2003.
- *Das Gehirn nimmt die Welt nicht so wahr, wie sie ist*, en M. Eckoldt, *Kann das Gehirn das Gehirn verstehen? Gespräche über Hirnforschung und die Grenzen unserer Erkenntnis*. Carl-Auer-Verlag: Heidelberg, 2013, págs. 117-141.
- SÁNCHEZ, F. *Quod Nihil Scitur*, en S. Rabade, J. M. Artola & M. F. Pérez (Eds.). CSIC: Madrid, 1984.
- SANTO TOMÁS. *Summa Theologiæ*, Volume 11, Man (Ia. 75 – 83). Cambridge University Press: Cambridge, 2006.
- SEBEOK, T. *Signos: Una introducción a la semiótica*. Paidós: Barcelona, 1996.
- SEXTO EMPÍRICO. *Esbozos pirrónicos*. Gredos: Madrid, 1993.
- SCHMIDT, J. S. *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Frankfurt: Suhrkamp Verlag, 1987.
- UEXKÜLL, J. VON. «Studien über den Tonus V. Die Libellen», *Zeitschrift für Biologie*, 50, 1907, págs. 168-202.
- *Theoretical Biology*. Kegan Paul, Trench, Trubne and Co.: Londres, 1926.
- *Ideas para una concepción biológica del mundo*. Espasa: Madrid, 1934.
- *Meditaciones biológicas. Teoría de la significación*, en J. M. Sacristán (Trad.). Revista de Occidente: Madrid, 1942.
- VARELA, F. «El círculo creativo. Esbozo histórico-natural de la reflexividad», *Suplemento Anthropos*, 22, 1994, págs. 55-61.
- VICO, G. *De Antiquissima Itolorum Sapientia*, en F. J. Navarro (Trad.), *Cuadernos sobre Vico 11-12, 1999-2000*. Editorial Universidad de Sevilla (EUS): Sevilla, 2000, págs. 443 – 483.
- VOLLMER, G. *Evolutionäre Erkenntnistheorie*. Hirzel Verlag: Auflage, 2002.
- WAGENSBERG, J. *El pensador intruso*. TusQuets: Barcelona, 2018.
- WATZLAWICK, P. *Vom Unsinn des Sinns oder vom Sinn des Unsinn*. Wien: Picus, 1992.
- *¿Es real la realidad?* Herder: Barcelona, 1994.
- *La coleta del Barón de Münchhausen*. Herder: Barcelona, 2009.

Bibliografía consultada (no citada):

- AREOPAGITA, D. *Los nombres de Dios*, en T. H. Martín (Ed.), *Obras completas*. Biblioteca de Autores Cristianos: Madrid, 2007.
- ARAYA, V.; ALFARO, M. & ANDONEGUI, M. «Constructivismo: orígenes y perspectivas», *Laurus*, 13, 24, 2007, págs. 76-92.
- BATESON, G. & RUESCH, J. *Comunicación. La matriz social de la Psiquiatría*. Paidós: Barcelona, 1984.
- BERGER, P. L. & LUCKMANN, T. *The Social Construction of Reality. A Treatise in the Sociology of Knowledge*. Doubleday: New York, 1966.
- BERKELEY, G. *De Motu, The Works of George Berkeley, Vol. 1: Philosophical Works, 1705-21*. Clarendon Press: Oxford, 2012.
- BERTALANFFY, L. VON. «General System Theory-A Critical Review», *General Systems Yearbook*, 7, 1962, págs. 1-20.
- BIRDWHISTELL, R. L. «Contribution of Linguistic-Kinesic Studies to the Understanding of Schizophrenia», en A. Auerback (Ed.), *Schizophrenia: An Integrated Approach*, Ronald Press: New York, 1959, págs. 99-123.
- D' AQUILI, E. «The Neurobiological Basis of Myth and Concepts of Deity», *Zygon*, 13, 1978, págs. 257–275.
- «The Myth Ritual Complex: A Biogenetic Structural Analysis», *Zygon*, 18, 1983, págs. 247–269.

- FEYNMAN, R. *¿Está Ud. de broma Sr. Feynman?* Alianza Editorial: Madrid, 2010.
- FISCHER, H. R. «‘Grammar’ and ‘language-game’ as concepts for the analysis of schizophrenic communication», en R. Wodak & P. Van Craen (Eds.), *Neurotic and Psychotic Language Behaviour*. Multilingual Matters LTD: Clevedon, 1987, págs. 165-199.
- GESCHWIND, N. «Disconnexion Syndromes in Animals and Man», en D. Davidson et al. (Eds.), *Selected Papers on Language and the Brain, XVI*. Reidel Publishing Company: Boston, 1965, págs. 105–236.
- «Siegener Gespräche über Radikalen Konstruktivismus», en S. J. Schmidt (Ed.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, 1987, págs. 401-440.
- HUME, D. *Investigación sobre el conocimiento humano*. Alianza: Madrid, 1988.
- *Tratado sobre la naturaleza humana*. Libros en la red (Edición electrónica): Albacete, 2001.
- IZUZQUIZA, I. «Constructivismo, cibernética y teoría de la observación. Notas para una propuesta teórica», *Enseñanza de las Ciencias Sociales*, 5, 2006, págs. 107-114.
- JAMES, W. *The Principles of Psychology*. Harvard University Press: Cambridge, 1983.
- JASPERS, K. *Von der Wahrheit*. R. Piper & Co.: Verlag, Munich, 1947.
- JUNG, C. G. *Arquetipos e inconsciente colectivo*. Paidós: Barcelona, 1970.
- LLINÁS, R. *I of the vortex*. Massachusetts Institute of Technology Press: Cambridge, 2001.
- MALEBRANCHE, N. *Conversations chrétiennes, Œuvres complètes* (2ª ed.). Librairie Philosophique Vrin: París, 1972.
- MATURANA, H. *Biology of Cognition*. Biological Computer Laboratory: Illinois, 1970.
- *La realidad: ¿objetiva o construida?* Anthropos: Barcelona, 1996.
- POPPER, K. *Objective Knowledge, An Evolutionary Approach*. Oxford University Press: Oxford, 1972.
- ROCKMORE, T. «Vico y el constructivismo», *Cuadernos sobre Vico 11-12 (1999-2000)*. Editorial Universidad de Sevilla (EUS): Sevilla, 2000, págs. 193-199.
- RODRIGO, M. J. «¿Es compatible el constructivismo piagetiano con el del procesamiento de la información?», *Anuario de psicología*, 69, 1996, págs. 123-126.
- ROHAULT, J. *Rohault's System of Natural Philosophy*, en J. Knapton (Impr.). St. Paul's - Church Yard: Londres, 1723.
- ROTH, G. *Möglichkeiten und Grenzen von Wissensvermittlung und Wissenserwerb – Erklärungsansätze aus Lernpsychologie und Hirnforschung*, en R. Caspary (Ed.), *Lernen und Gehirn. Der Weg zu einer neuen Pädagogik*. Herder: Freiburg im Breisgau, 2006, págs. 54-69.
- RUBIA, F. J. *El cerebro nos engaña*. Temas de Hoy: Madrid, 2007.
- SCHMIDT, S. J. «Der Radikale Konstrktivismus: Ein neues Paradigm aim interdisziplinären Diskurs», en S. J. Schmidt (Ed.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, 1987, págs. 11-88.
- SHANNON, C. E. «A Mathematical Theory of Communication», *Bell System Technical Journal*, 27, 1948, págs. 379-423.
- & WEAVER, W. *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press: Illinois, 1949.
- UEXKÜLL, J. VON. «Psychologie und Biologie in ihrer Stellung zur Tierseele», *Ergebnisse der Physiologie*, 1 (2), 1902, págs. 212 – 233.
- *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Springer: Berlin, 1909.
- *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen: Ein Bilderbuch unsichtbarer Welten*. Springer: Berlin, 1934.
- WATZLAWICK, P., BEAVIN, J. H. & JACKSON, D. D. *Teoría de la comunicación humana*. Herder: Barcelona, 1985.
- WATZLAWICK, P. & CEBERIO, M. R. *La construcción del universo*. Herder: Barcelona, 1998.
- WATZLAWICK, P., BAVELAS, J. B. & JACKSON, D. D. *Pragmatics of Human Communication*. W. W. Norton & Company: New York, 2011.

CAPÍTULO II: CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO

- ARISTOTELES. *Física*. Gredos, Madrid, 1995.
- BOHR, N. *Física atómica y conocimiento humano*. Aguilar: Madrid, 1964.
- BOYD, R. «On the Current Status of the Issue Scientific Realism», *Erkenntnis*, Vol 19, No. 1/3, Methodology, Epistemology, and Philosophy of Science, 1984, págs. 45-90.
- BROWN, J. R. *Smoke and Mirrors. How Science Reflects Reality*. Routledge: London, 1994.

- CALVO, D. *Modelos teóricos y representación del conocimiento*. Tesis de la Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Filosofía, Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia. Repositorio de producción académica UCM: Madrid, 2006.
- CARTWRIGHT, N. *How the Laws of Physics Lie*. Clarendon Press: Oxford, 1983.
- CHOMSKY, N. *Estructuras sintácticas*. Siglo XXI: Madrid, 1975.
- *Aspectos de la teoría de la sintaxis*. Aguilar: Madrid, 1976
- *El lenguaje y el entendimiento*. Seix Barral: Barcelona, 1986.
- CHURCHLAND, P. M. *A Neurocomputational Perspective. The Nature of Mind and the Structure of Science*. MIT Press: Cambridge, MA, 1992.
- CHURCHLAND, P. S. & SEJNOWSKI, T. J. *The Computational Brain*. MIT Press: Cambridge, MA, 1992.
- DEMÓCRITO. *Fragmentos presocráticos: De Tales a Demócrito*. Alianza: Madrid, 2008.
- DIÉGUEZ, A. *Realismo Científico: Una introducción al debate actual en filosofía de la ciencia*. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga: Málaga, 1998.
- DUHEM, P. *To Save the Phenomena*. The University Chicago Press: Chicago, 1985.
- ECHEVERRÍA, J. *Introducción a la metodología de la ciencia*. Barcanova: Barcelona, 1989.
- EINSTEIN, A. «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*, 17, 1905, págs. 891-921.
- *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Alianza: Madrid, 1994.
- EISBER, R. & RESNICK, R. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. John Wiley & Sons: New York, 1985.
- ELENA, A. *Las quimeras de los cielos. Aspectos epistemológicos de la revolución copernicana*. Siglo XXI: Madrid, 1985.
- ESSEN, D. C., ANDERSON, C. H. & FELLEMAN D.J. «Information Processing in the Primate Visual System: An Integrated Systems Perspective», *Science*, 255, 1992, págs. 419—423.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. *La aventura del descubrimiento*. Encuentro: Madrid, 2009.
- FEYERABEND, P. K. «Explanation, Reduction and Empiricism», en P. K. Feyerabend (Ed.), *Realism, Rationalism and Scientific Method, Philosophical Papers, Vol. 1*. Cambridge University Press: Cambridge, 1981.
- FINE, A. «How to Compare Theories: Reference and Change», *Nous*, 9, 1975, págs. 17-32.
- FOERSTER, H. VON. «Über das Konstruieren von Wirklichkeiten», en H. von Foerster (Ed.), *Sicht und Einsicht. Versuche zu einer operativer Erkenntnistheorie*. Braunschweig-Wiesbaden: Vieweg, 1958.
- FRAASEN, B. VAN. *Scientific Representation. Paradoxes of Perspective*. Clarendon Press: Oxford, 2008.
- GIERE, R. «Cognitive Models in the Philosophy of Science», *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Volume Two: Symposia and Invited Papers*, 1986, págs. 319-328.
- «The Cognitive Construction of Scientific Knowledge (Response to Pickering)», *Social Studies of Science*, 22, 1992, págs. 95-107.
- GLASERSFELD, E. VON. «Introducción al constructivismo radical», en P. Watzlawick (Ed.), *La realidad inventada*. Gedisa: Barcelona, 1994, págs. 20-37.
- *Radical Constructivism: A Way of Knowing and Learning*. Routledge Falmer: London, 1995a.
- «The Radical Constructivist View of Science», en A. Riegler (Ed.), *Foundations of Science, special issue on "The Impact of Radical Constructivism on Science"*, 6, 1-4, 2001, págs. 31-43.
- GONZÁLEZ, W. J. «El realismo y sus variedades: El debate actual sobre las bases filosóficas de la ciencia», en A. Carreras (Ed.), *Conocimiento, ciencia y realidad*. Mira Editores: Zaragoza, 1993, págs. 11-58.
- GREENE, B. *La realidad oculta*. Paidós: Barcelona, 2013.
- HAACK, S. «Realism», *Synthese*, 73, 1987, págs. 275-299.
- HEISENBERG, W. *Physics and Philosophy*. Allen & Unwin: London, 1963.
- *Ordnung der Wirklichkeit*. Piper Verlag: Munich, 1994.
- HUBBEL, D. H. & WIESEL, T. N. «Receptive Fields and Functional Architecture of Monkey Striate Cortex», *Journal of Physiology*, 195, 1968, págs. 215-243.
- JOAN, D. *A life of One's Own: Three Gifted Women and the Men They Married*. Harper & Row: New York, 1973.
- KANT, E. *Crítica de la razón pura*. Alfaguara: Madrid, 1997.
- KERNSTENS, J. G. & STURN, A, N. *Taalkunde als wetenschap*. University of California: Nijhoff, 1989.
- KITCHER, P. *The Advancement of Science*. Oxford University Press: Oxford, 1993.
- KUHN, T. *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica: México, 2004.
- LANDAU, L. & LIFSHITZ, E. *Teoría clásica de los campos*. Reverté: Barcelona, 1992.
- LAUDAN, L. *El progreso y sus problemas. Hacia una teoría del crecimiento científico*. Ediciones Encuentro: Madrid, 1986.

- LOMBARDI, O. «La noción de modelo en ciencias», *Educación en ciencias*, 2 (4), 1998, págs. 5-13.
- MARCELLÁN, F.; ZARZO, A. & CASASÚS, L. *Ecuaciones diferenciales. Problemas y aplicaciones*. McGraw Hill Editorial: Madrid, 1991.
- MARCH, R. H. *Física para poetas*. Siglo XXI: México, 1988.
- MATURANA, H. «Science and Daily Life: The Ontology of Scientific Explanations», en F. Steier (Ed.), *Research and Reflexivity*. SAGE Publishers: London, 1991, págs. 30-52.
- MOSTERÍN, J. *Ciencia, filosofía y racionalidad*. Gedisa: Barcelona, 2013.
- MOULINES, U. *Pluralidad y recursión. Estudios epistemológicos*. Alianza: Madrid, 1991.
- *Popper y Kuhn, dos gigantes de la Filosofía de la ciencia del siglo XX*. Bolla letra Alcompas, S. L.: España, 2015.
- NEWTON, I. *Opticks*. Sam Smith & Benj.: London, 1704.
- *Principios matemáticos de la Filosofía Natural*. Tecnos: Madrid, 2011.
- NIINILUOTO, I. «Progress, Realism, and Verisimilitude», en P. Weingartner & G. Schurz (Eds.), *Logic, Philosophy of Science and Epistemology*. Hölder-Pichler-Tempsky: Viena, 1987, págs. 151-161.
- PESCHL, M. F. «Embodiment of Knowledge in the Sensory System and Its Contribution to Sensorimotor Integration. The Role of Sensors in Representational and Epistemological Issues», en P. Gausser & J. D. Nicouds (Eds.), *From Perception to Action Conference*. IEEE Society Press: Los Alamitos, CA, 1994, págs. 444-447.
- POPPER, K. «On a realistic and commonsense interpretation of Quantum theory», en K. R. Popper (Ed.), *Quantum Theory and the Schism in Physics*. Hutchinson: London, 1982.
- «La racionalidad de las revoluciones científicas», *Teorema*, 13, 1-2, 1983, págs. 109-140.
- *The Myth of the Framework*, en M. A. Notturmo (Ed.). Routledge: London, 1994.
- PSILLOS, S. *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. Routledge: London, 1999.
- PTOLOMEO. *Las hipótesis de los planetas*. Alianza Editorial: Madrid, 1987.
- PUTNAM, H. «What is 'Realism'?», *Proceedings of the Aristotelian Society*, New Series, Vol. 76 (1975-1976), 1975, págs. 177-194.
- RIVADULLA, A. *Revoluciones en física*. Trotta: Madrid, 2003.
- «The Newtonian Limit of Relativity Theory and the Rationality of Theory Change», *Synthese*, 141, 2004a, págs. 417-429.
- *Éxito, razón y cambio en física*. Trotta: Madrid, 2004b.
- «Theoretical Models and Theories in Physics. A Rejoinder to Karl Popper's Picture of Science», en L. Magnani (Ed.), *Model Based Reasoning in Science and Engineering*. College Publications: London, 2006, págs. 75-85.
- «Modelos teóricos y racionalidad científica. Un enfoque instrumental de la teorización en física», en A. R. Pérez Ransanz & A. Velasco Gómez, *Racionalidad en ciencia y tecnología. Nuevas perspectivas iberoamericanas*. UNAM: México, 2011, págs. 337-344.
- *Éxito, razón y cambio en física*. Trotta: Madrid, 2014.
- *Meta, método y mito en ciencia*. Trotta: Madrid, 2015.
- ROTH, G. «Kognition: die Entstehung von Bedeutung im Gehirn», en W. Krohn & G. Küppers (Eds.), *Emergenz: die Entstehung von Ordnung. Organisation und Bedeutung*. Frankfurt/M: Suhrkamp, 1992, págs. 104-132.
- *Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Kognitive Neurobiologie und ihre philosophischen Konsequenzen*. Frankfurt/M: Suhrkamp, 1994.
- RUBIN, V., FORD, W. K. & THONNARD, N. «Rotational Properties of 21 SC Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii from NGC 4605 /R=4kpc/ to UGC 2885 /R=122kpc/», *Astrophysical Journal*, 238, 1980, págs. 471-87.
- SANTO TOMÁS. *The "Summa Theologica" of St. Thomas Aquinas. Part I QQ I.-XXVI*, en Padres de la Provincia Dominicana Inglesa (Trads.) (2ª Ed.), Vol. 1. 24/3/2017, Burns Oates and Washbourne: Londres, 1920.
- SCHEPHERD, G. M. *Neurobiology*. Oxford University Press: New York, 1994.
- SCHILPP, P. A. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, en P. A. Schilpp (Ed.), *The Library of Living Philosophers*. Evanston: Illinois, 1949.
- SCHORÖDINGER, E. *Mente y material*. TusQuets: Barcelona, 2016.
- SKLAR, L. *Theory and Truth*. Oxford University Press: Oxford, 2002.
- SNEED, J. *The Logical Structure of Mathematical Physics*. D. Reidel: Dordrecht, 1971.
- & COHEN, J. *The Collapse of Chaos: Discovering Simplicity in a Complex World*. Penguin Books: London, 2000.
- THAGARD, P. *Computational Philosophy of Science*. MIT Press: Cambridge, 1988.

- VARELA, F.J., THOMPSON, E. & ROSCH, E. *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press: Cambridge, 1991.
- WAGENSBERG, J. *El pensador intruso*. TusQuets: Barcelona, 2015.
- WEINBERG, S. *El sueño de una teoría final: La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*. Crítica: Barcelona, 2010.
- WORRALL, J. «Structural realism: the best of both worlds?», *Dialectica*, 43, 1989, págs. 99-124.

Bibliografía consultada (no citada):

- ADLER, C. G. «Does mass really depend on velocity, dad?», *American Journal of Physics*, 55, 1987, págs. 739-743.
- ARBIB, M. A. *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, en M. A. Arbib (Ed.). MIT Press: Cambridge, 1995.
- BERGER, P. & SINGER, M. *Dealing with Genes: The Language of Heredity*. University Science Books Cambridge: Mill Valley, CA, 1992.
- BONIOLO, G.; PETROVICH, C. & PISENT, G. «Notes on the Philosophical Status of Nuclear Physics», *Foundations of Science*, 7, 2002, págs. 425-452.
- BORTOFT, H. *The Wholeness of Nature: Goethe's Way Toward a Science of Conscious Participation in Nature*. Lindisfarne Books: New York, 1996.
- BOYD, R. «Realism, Underdetermination, and a Causal Theory of Evidence», *Noûs*, Vol. 7, No. 1, 1973, págs. 1-12.
- «Scientific Realism and Naturalistic Epistemology», *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Volume Two: Symposia and Invited Papers*, 1980, págs. 613-662.
- BRONOWSKI, J. *El sentido común de la ciencia*. Ediciones Península: Barcelona, 1978.
- BROWNE, T. *Religio Medici*. John B. Alden: New York, 1839.
- BRUNER, J. S. & POSTMAN, L. «On the Perception of Incongruity: A Paradigm», *Journal of Personality*, XVIII, 1949, págs. 206-223.
- BRUNSWIK, E. «Ratiomorphic models of perception and thinking», *Acta Psychologica*, 11, 1955, págs. 108-109.
- CANGELOSI, A., PARISI, D. & NOLFI, S. «Cell division and migration in a genotype for neural networks», *Network: Computation in Neural Systems*, 5, 4, 1994, págs. 497-516.
- CAPEK, M. *The Philosophical Impact of Contemporary Physics*. D. Van Nostrand: Princeton, New Jersey, 1961.
- CASSIRER, E. *Filosofía de las formas simbólicas, Vol. I*. Fondo de Cultura Económica: México, 1998.
- *The Engine of Reason, the Seat of the Soul. A Philosophical Journey Into the Brain*. MIT Press: Cambridge, 1995.
- D'AQUILLI, E. «The Neurobiological Bases of Myth and Concepts of Deity», *Zygon*, 13, 4, 1978, págs. 257-274.
- «The myth-ritual complex: A biogenetic structural analysis», *Zygon*, 18, 3, 1983, págs. 247-269.
- DAVIES, P. C. W. & BROWN, J. R. *El espíritu del átomo. Una discusión sobre los misterios de la física cuántica*. Alianza: Madrid, 1989.
- DEHAENE, S. *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics*. Oxford University Press: New York, 1997.
- DOIG, P. *A Concise History of Astronomy*. Chapman & Hall Ltd: London, 1950.
- DRAKE, S. *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science, Volume 1*. University of Toronto Press: Toronto, 1999.
- EDELMANN, G. M. *Topobiology: An Introduction to Molecular Embryology*. Basic Books: New York, 1988.
- FAUVEL, J., FLOOD, R. & WILSON, R. *Music and Mathematics: From Pythagoras to Fractals*. Oxford University Press: Oxford, 2006.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. *Los muchos rostros de la ciencia*. Fondo de Cultura Económica: México, 2003.
- FODOR, J. A. *Representations: Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science*. MIT Press: Cambridge, MA, 1981.
- FODOR, J. A. & PYLYSHYN, Z. W. «Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis», *Cognition*, 28, 1-2, 1988, págs. 3-71.
- FOERSTER, H. VON. «Construyendo una realidad», en P. Watzlawick (Ed.), *La realidad inventada*. Gedisa: Barcelona, 1994, págs. 38-56.
- *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*. Springer-Verlag: New York, 2003.

- GALILEO. *El Ensayador [Il Saggiatore]*, en J. M. Revuelta (Trad.). Ediciones Aguilar: Buenos Aires, 1984.
- GESCHWIND, N. & GALABURDA, A. M. *Cerebral lateralization*. MIT Press: Cambridge, MA, 1987.
- GIERE, R. «Constructive Realism», en P. M. Churchland & C. A. Hooker (Eds.), *Images of Science*. University of Chicago Press: Chicago, 1985, págs. 75-98.
- «How Models Are Used to Represent Reality», *Philosophy of Science*, 71, 2004, págs. 742-752.
- GLASERSFELD, E. VON. «Despedida de la objetividad», en P. Watzlawick (Ed.), *El ojo del observador. Contribuciones al constructivismo*. Gedisa: Barcelona, 1995b, págs. 19-31.
- GOETHE, J. W. *Fausto*. Biblioteca Arte y Letras: Barcelona, 1882.
- *Goethe y la ciencia*. Ediciones Siruela: Madrid, 2002.
- GREENE, B. *The Elegant Universe*. Vintage Books: New York, 2001.
- GREGORY, R. L. *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*. McGraw-Hill Book Company: New York, 1978.
- HANSON, N. R. *Patterns of Discovery*. Cambridge University Press: Cambridge, 1965.
- HARDIN, C. & ROSENBERG, A. «In Defense of Convergent Realism», *Philosophy of Science*, Vol. 49, No. 4, 1982, págs. 604-615.
- HARDY, G. H. *A Mathematician's Apology*. Cambridge University Press: Cambridge, MA, 2004.
- HEISENBERG, W. *Das Naturbild der heutigen Physik*. Hamburg: Rowohlt, 1955.
- HELMHOLTZ, H. «Vorlesungen über Theoretische Physik». Bd. VI: Vorlesungen, 1922.
- HERTZ, J., KROGH, A. & PALMER, R. G. *Introduction to the Theory of Neural Computation, Volume 1 of Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Lecture Notes*. Addison-Wesley: Redwood City, CA, 1991.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. University of Michigan Press: Ann Arbor, 1975.
- HORGAN, T. & TIENSON, J. *Connectionism and the Philosophy of Psychology*. MIT Press: Cambridge, MA, 1966.
- JAMES, W. *Essays in Radical Empiricism*, en F. Burkhardt & F. Bowers (Eds.). Harvard University Press: Cambridge, MA, 1976.
- JESSEL, T. M. «Neural Survival and Synapse Formation», en E. R. Kandel, J.H. Schwartz & T. M. Jessel (Eds.), *Principles of Neural Science*. Elsevier: New York, 1991, págs. 929-944.
- KUHN, T. «Cambio de teoría como cambio de estructura: comentarios sobre el formalismo de Sneed», *Teorema*, 7, 2, 1977, págs. 141-166.
- «¿Qué son las revoluciones científicas», *¿Qué son las revoluciones científicas? Y otros ensayos*. Paidós: Barcelona, 1989, págs. 55-93.
- LAKOFF, G. & NÚÑEZ, R. E. *Where Mathematics Comes From*. Basic Books: New York, 2000.
- LANGTON, C. G. *Artificial Life*. Addison-Wesley: Redwood City, CA, 1989.
- *Artificial Life III*. Addison-Wesley: Redwood City, CA, 1994
- *Artificial Life. An Introduction*. MIT Press: Cambridge, MA, 1995.
- LEPLIN, J. «Realism and Methodological Change», *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Volume One: Contributed Papers*, 1992, págs. 435-445.
- LORENZ, K. *Behind the Mirror: A Search for a Natural History of Human Knowledge*. Methuen: London, 1977.
- MATURANA, H. *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. D. Reidel Pub. Co.: Boston, 1980.
- «Reality: The Search for Objectivity or the Quest for a Compelling Argument», *The Irish Journal of Psychology*, 9, 1, 1988, págs. 25-82.
- & Varela, F. *De Máquinas y Seres Vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo*. Lumen: Buenos Aires, 1994.
- MAXWELL, G. «Theories, Perception and Structural Realism», en R. G. Colodny (Ed.), *The Nature and Function of Scientific Theories*, 3, 34. University of Pittsburgh Press: Pittsburgh, 1970.
- MITCHELL, M. & FORREST, S. «Genetic Algorithms and Artificial Life», *Artificial Life*, 1, 3, 1994, págs. 267—291.
- NEEDHAM, J. *Science and Civilisation in China, Volume 3: Mathematics and the Sciences of the Heavens and the Earth*. Cambridge University Press: Cambridge, MA, 2005.
- NEWTON-SMITH, W. «The Underdetermination of Theory by Data», *Proceedings of the Aristotelian Society, Supplementary Volumes*, Vol. 52, 1978, págs. 71-107.
- PENROSE, R. *La nueva mente del emperador*. Fondo de Cultura Económica: México, 1991.
- *Repräsentation und Konstruktion. Kognitions- und neuroinformatische Konzepte als Grundlage einer naturalisierten Epistemologie und Wissenschaftstheorie*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1994b.

- «The Representational Relation Between Environmental Structures and Neural Systems: Autonomy and Environmental Dependency in Neural Knowledge Representation», *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 1, 2, 1997, págs. 99-121.
- POPPER, K. *La lógica de la investigación científica*. Madrid: Tecnos, 1980.
- *Conjeturas y refutaciones*. Paidós: Barcelona, 1991.
- PORT, R. & GELDER, T. V. *Mind as Motion: Explorations in the Dynamic of Cognition*. MIT Press: Cambridge, MA, 1995.
- PRIGONINE, I. *El fin de las certidumbres*. Madrid: Taurus, 1996.
- RORTY, R. *Contingency, Irony, and Solidarity*. Cambridge University Press: Cambridge, MA, 1989.
- *Truth and Progress, Philosophical Papers*. Cambridge University Press: Cambridge, MA, 1998.
- RUMELHART, D. E. & MCCLELLAND, J. L. (): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Foundations*, Volume I. MIT Press: Cambridge, MA, 1986.
- SARTON, G. «Early Observations of the Sunspots?», *Isis*, 37, 1947, págs. 69-71.
- SEJNOWSKI, T. J., KOCH, K. & CHURCHLAND, P. S. «Computational Neuroscience», *Science*, 241 (4871), 1988, págs. 1299-1306.
- SCHMIDT, S. J. *Die Zählung des Blicks. Konstruktivismus —Empire— Wissenschaft*. Frankfurt/M: Suhrkamp, 1998.
- SIMPSON, G. G. «Biology and the Nature of Science», *Science*, Vol. 139, No. 3550, 1963, págs. 81-88.
- *This View of Life: The World of an Evolutionist*. Harcourt, Brace & World: New York, 1964.
- SMART, J. J. C. «Laws of Nature and Cosmic Coincidences», *The Philosophical Quarterly*, Vol. 35, No. 140, 1985, págs. 272-280.
- SMOLIN, L. *The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Houghton Mifflin Company: Boston-New York, 2007.
- STEWART, I. *¿Juega Dios a los dados?* Crítica: Madrid, 1996.
- STRATTON, G. M. «Vision without Inversion of the Retinal Image», *Psychological Review*, IV, 1897, págs. 341-360, 463-481.
- VON FOERSTER, H. «Über das Konstruieren von Wirklichkeiten», en H. von Foerster (Ed.), *Sicht und Einsicht. Versuche zu einer operativer Erkenntnistheorie*. Braunschweig-Wiesbaden: Vieweg, 1958.
- YABLO, S. *Aboutness*. Princeton University Press: Princeton, NJ, 2014.

CAPÍTULO III: ANALOGÍA Y METÁFORA EN CIENCIA

- ARISTÓTELES. *Parts of Animals*. London: William Heinemann Ltd, 1961.
- *Acerca de la generación y la corrupción*. Madrid: Gredos, 1987.
- *Política*. Madrid: Gredos, 1988.
- *Metafísica*. Madrid: Gredos, 1994.
- *Física*. Madrid: Gredos, 1995.
- *Acerca del cielo*. Madrid: Gredos, 1996.
- ASIMOV, I. *Cien preguntas básicas sobre la física*. Ediciones Tiempo: Madrid, 1991.
- BARTHA, P. F. A. *By Parallel Reasoning: The Construction and Evaluation of Analogical Arguments*. Oxford University Press: Oxford, 2010.
- BENVENISTE, E. *Noms d' agents et noms d' action en indo-europeens*. París: Klincksieck, 1948.
- BLACK, M. *Modelos y metáforas*. Tecnos: Madrid, 1966.
- BOHR, N. *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Alianza: Madrid, 1988.
- BOYLE, R. *The Origins of forms and Qualities (according to the corpuscular philosophy) illustrated by (1) considerations and (2) experiments*, en J. Bennet (Ed.). Text Creation Partnership: Oxford, 2017.
- BUSTOS, E. *La metáfora: ensayos transdisciplinarios*. Fondo de Cultura Económica: Madrid, 2000.
- «Argumentando una innovación conceptual: Metáfora y argumentación analógica», *Revista Iberoamericana de Argumentación*, 2013, págs. 1-17.
- «Metáfora y cognición corpórea», *Perspectivas en la filosofía del lenguaje*, 2, Prensas de la Universidad de Zaragoza: Zaragoza, 2016.
- CASSIRER, E. *Filosofía de las formas simbólicas*. Fondo de Cultura Económica: México, 1971.
- CAYETANO. *Scripta philosophica: De nominum analogia*. Roma: Angelicum, 1934.
- CLAGETT, M. *Science of Mechanics in the Middle Ages*. Oxford University Press: London, 1959.

- CROMBIE *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo*. Alianza: Madrid, 1996.
- DARWIN, C. R. *El origen de las especies por medio de la selección natural. Tomo I*. Austral: Madrid, 1921.
- DESCARTES, R. *El mundo. Tratado de la luz*, en S. Turró (Ed.). Anthropos: Barcelona, 1989.
- DESCARTES, R. *Los principios de la filosofía*. Alianza Editorial: Barcelona, 2002.
- DUHEM, P. *Le Système du Monde. Histoire des Doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 Vols., 1913-1919, Librairie Scientifique: Paris, 1913.
- EINSTEIN, A. «Time, Space, and Gravitation», *Science*, Vol. 51, 1920, págs. 8-10.
- *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Alianza Editorial: Madrid, 2012.
- *Relativity*. Routledge Classics: New York, 2014.
- GALILEO. *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo: Ptolemaico y Copernicano*. Wikisource (Versión online), 1632.
- GENTNER, D. & JEZIORSKI, M. «The shift from Metaphor to analogy in Western science», en A. Ortony (Ed.), *Metaphor and Thought*. Cambridge University Press: Cambridge, MA, MA, 1993, págs. 447-480.
- GUTHRIE, W. K. C. *In the Beginning: Some Greeks views on the Origins of life and the early state of man*. Cornell University Press: New York, 1957.
- HARRÉ, R.; ARONSON J. L. & WAY, E. C. «Apparatus as Models of Nature», en Hallyn, F. (ed.), *Metaphor and Analogy in the Sciences*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2000.
- HEIDEGGER, M. *Introducción a la metafísica*. Barcelona: Gedisa, 2001.
- HEISENBERG, W. *Más allá de la Física*. Biblioteca de Autores Cristianos: Madrid, 1974.
- HENLE, P. «Metaphor», en P. Henle (Ed.), *Language, Thought and Culture*, Cap. VII. University of Michigan Press: Ann Arbor, Michigan, 1958, págs. 173-195.
- HERRERO, M. A. *Símbolo y metáfora en física*. Punto Rojo: Sevilla, 2016.
- HOFSTADTER, D. & SANDER, E. *La analogía*. Barcelona: TusQuets, 2018.
- HOLT, J. *Les noms d' action en -sis (-tis). Études de linguistique grecque (Acta Jutlandica XIII, I)*. Universitetsforlaget: Copenhagen, 1941.
- HOLTON, G. *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Alianza: Madrid, 1982.
- HOLYOAK, K. & THAGARD, P. *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*. MIT Press: Cambridge, MA, 1995.
- HOMERO. *Odisea*. Madrid: Gredos, 1993.
- JAEGER, W. *Paideia: Los ideales de la cultura griega, Libro II*. Fondo de Cultura Económica: México, 2001.
- KIRK, G. S. *Heraclitus: The Cosmic Fragments*. Cambridge University Press: Cambridge, MA, 1954.
- KOESTLER, A. *The Act of Creation*. Hutchinson & Co.: Londres, 1964.
- KOYRÉ, A. *Estudios galileanos*, en M. González Ambóu (Trad.). Siglo XXI Editores: Madrid, 1980.
- KUHN, T. *La revolución copernicana*. Ariel: Barcelona, 1978.
- *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica: México, 2004.
- LAKOFF, G. & JOHNSON, M. *Metáforas de la vida cotidiana*. Cátedra: Madrid, 2017.
- LAKOFF, G. & NÚÑEZ, R. E. *Where Mathematics Comes From*. Basic Books: New York, 2000.
- LAKATOS, I. *La metodología de los programas de investigación científica*. Alianza Editorial: Madrid, 1983.
- LÉVY-BRUHL, L. *Primitive Mentality*. Filiquarian Legacy Publishing: Minneapolis, 2012.
- LOCKE, J. *Ensayo sobre el entendimiento humano*. Fondo de Cultura Económica: México, 2005.
- LONIE, I. M. *The Hippocratic Treatises "On Generation", "on The Nature of the Child", "Diseases IV": A Commentary*. Gruyter: Berlin, 1981.
- MALINOWSKI, B. *Una teoría científica de la cultura*. Edhasa: Barcelona, 1981.
- MÁRSICO, C. *Polythrýleta. Sistemas explicativos y mutación conceptual en el pensamiento griego*. Editorial Rhesis: Buenos Aires, 2011.
- NADDAF, G. *The Greek Concept of Nature*. University of New York Press: Albany State, 2005.
- NEWTON, I. *Principios matemáticos de la Filosofía Natural*, en A. Escotado (Trad.). Tecnos: Madrid, 1987.
- NISBET, R. A. *Cambio social e historia. Aspectos de la teoría occidental sobre el desarrollo*. Editorial Hispano Europea: Barcelona, 1976.
- PALMA, H. «El desarrollo de las ciencias a través de las metáforas», *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, Vol. 2, Núm. 6, 2005, págs. 45-65.
- PALMA, H. A. *Metáforas y modelos científicos*. Buenos Aires: Zorzal, 2008.
- PENROSE, R. *La nueva mente del emperador*. Penguin Random House: Barcelona, 2011.
- PLATÓN. *Político*. Madrid: Gredos, 1988.
- PLATÓN. *Timeo, Diálogos, Vol. 6*. Madrid: Gredos, 1992.
- PLATÓN. *Leyes, Libros VII-XII, Diálogos, Vol. 9*. Madrid: Gredos, 1999.

- RIVADULLA, A. «Metáforas y modelos en ciencia y filosofía», *Revista de Filosofía*, Vol. 31, Núm. 2, 2006, págs. 189-202.
- «Precisiones sobre la estrategia tropológica en ciencia», *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, Vol. 187-747, 2011, págs. 109-115.
- ROSSETTI, L. «El tratado *Peri physeōs* de Anaximandro: un nuevo tipo de enciclopedia», *Nova Tellvs*, 32-2, 2015, págs. 57-73.
- RUSELL, B. *Historia de la filosofía occidental. Tomo I*. Madrid: Espasa, 1997.
- SALAS, I. «The Problem of Dualism: The Self as a Cultural Exaptation», en L. Hagley-Dickinson (Ed.), *IAFOR Journal of Ethics, Religion & Philosophy*, 3, 2, 2017, págs. 98-106.
- «Valores epistémicos de la metáfora científica: Algunas consideraciones teórico-prácticas», en B. Almeida, A. Blanco, J.J. García y M.^a D. Jiménez (Eds.), *Investigaciones actuales en Lingüística, Vol. II: Semántica, Lexicología y Morfología*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá: Alcalá de Henares, 2017, págs. 293-304.
- «Ciencia y metáfora», *Lingüística prospectiva. Tendencias actuales en estudios de la lengua entre jóvenes investigadores*. Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla, 2020, págs. 421-432.
- SALVATICO, L. *Depurando el mecanicismo moderno*. Editorial Brujas: Córdoba (Argentina), 2006.
- SAMBURSKY, S. *El mundo físico de los griegos*. Madrid: Alianza, 1990.
- SMOLIN, L. *The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Mariner Books: New York, 2007.
- SPENCER, H. *First Principles. New System of Philosophy*. D. Appleton and Company: New York, 1865.
- *The Principles of Sociology*. D. Appleton and Company: New York, 1898.
- WHEELWRIGHT, P. *Metáfora y realidad*. Espasa-Calpe: Madrid, 1979.

Bibliografía consultada (no citada):

- ARISTÓTELES. *Poética*. Fondo Blanco Editorial (Versión online), 2014.
- BACHELARD, G. *La formación del espíritu científico. Contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo*. Siglo XXI Editores: Buenos Aires, 2004.
- BURNET, J. *Early Greek Philosophy*. London: Adam and Charles Black, 1945.
- CHERNISS, H. *Aristotle's Criticism of Presocratic Philosophy*. John Hopkins University Press: Baltimore, 1935.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. *Los muchos rostros de la ciencia*. La Ciencia para Todos, FCE: México, 2003.
- GALILEO. *El ensayador*, en J. M. Revuelta (Trad.). Aguilar, Sarpe: Buenos Aires, 1984.
- HOFFMANN, B. *Einstein*. Biblioteca Salvat: Madrid, 1987.
- LAÍN ENTRALGO, P. *La medicina hipocrática*. Revista de Occidente: Madrid, 1970.
- LAÍN ENTRALGO, P. *El cuerpo humano: Oriente y Grecia Antigua*. Espasa: Madrid, 1987.
- MARGENAU, H. *La naturaleza de la realidad física*. Tecnos: Madrid, 1970.
- ORTEGA Y GASSET, J. «Las dos grandes metáforas» *Obras completas*, Tomo II (1916-1934), Ediciones Castilla: Madrid, 1963, págs. 387-400.
- PÁEZ, Y. «Phýsis, téchnê, epistêmê: Una aproximación hermenéutica», *Eidos: Revista de Filosofía de la Universidad del Norte*, 20, 2014, págs. 38-52.
- POPPER, K. *La lógica de la investigación científica*. Madrid: Tecnos, 1980.
- SALGUERO-LAMILLAR, F. J. «Sobre ficción, lenguaje, (con)ciencia y modelos de interpretación», *Philologia Hispalensis*, 27/3-4, 2013, págs. 113-138.
- SANTO TOMÁS. *De los principios de la naturaleza*. Buenos Aires: Aguilar, 1962.
- *De veritate, Cuestión 2: La ciencia de Dios*. Pamplona: Cuadernos de Anuario Filosófico, 2000.
- WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Tusquets: Barcelona, 1989.
- WHITNEY, W. D. *Max Müller and the Science of Language: A Criticism*. Appleton and company: New York, 1892.
- YAU, S. T. & NADIS, S. *The Shape of Inner Space: String Theory and the Geometry of the Universe's Hidden Dimensions*. Basic Books: New York, 2010.

ÍNDICE ONOMÁSTICO

- a posteriori, 28
a priori, 26, 27, 28, 73, 80
abstracción, 28, 45, 88
accidente, 26, 92
acoplamiento estructural, 31
adaptación, 27, 31, 32, 37, 38
agujero negro, 58
análisis, 3, 10, 12, 21, 23, 33, 64, 72, 87, 97, 115
análisis categorial, 72
analogía, 3, 24, 51, 64, 75, 76, 77, 78, 79, 82, 91, 95, 96, 98, 99, 100, 105, 106, 107, 126
analogía orgánica, 105, 106, 107
aprendizaje, 16, 34, 43
Aristóteles, 17, 20, 23, 46, 47, 48, 51, 84, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 101, 102, 115, 125
asimilación, 17, 32, 33
Asimov, 75, 125
auto-organización, 32
autopoiesis, 30, 35
auto-regulación, 32
Avicena, 24
Berkeley, 25, 115
bosón de Higgs, 110, 111
Brunswik, 115, 122
calor, 21, 22, 36, 53, 98, 103
campo magnético, 78
cantidad, 26, 43, 45, 80, 101, 110
Carl Friedrich Gauss, 81
caso límite, 55, 56, 57
causa, 18, 26, 31, 36, 55, 92, 93, 95, 97, 103
causalidad, 25, 26, 33, 35, 64, 106, 110
causalidad circular, 35
Charles R. Darwin, 107
cibernética, 19, 34, 35, 115, 118
ciclo funcional, 29, 30, 36
ciencia, 2, 8, 10, 11, 14, 20, 43, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 54, 55, 63, 68, 70, 73, 74, 75, 85, 86, 87, 88, 90, 96, 100, 104, 109, 111, 116, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 126, 127, 128
circularidad, 37
codificación no diferenciada, 36
cogito, 22
cognición, 3, 8, 11, 16, 41, 43, 45, 99, 119, 126
conductividad térmica, 53
conjetura, 53
conocimiento, 14, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 35, 38, 43, 44, 48, 49, 63, 72, 74, 76, 86, 99, 103, 118, 119, 128
constante de acoplamiento, 110
constante de Planck, 64, 79
constante de Stephan-Boltzmann, 61
constructivismo, 3, 15, 16, 19, 20, 25, 36, 41, 45, 115, 118, 119, 120, 123
constructivismo radical, 37
correspondencia, 39, 47, 48, 49, 57, 76, 77
creatividad, 10, 86
cruzamiento selectivo, 51
cualidad, 26, 98, 101
cuanto, 5, 14, 25, 29, 36, 43, 46, 62, 73, 84, 89, 93, 94, 107
cuanto de luz, 79
cuerpo negro, 61, 62, 78
Demócrito, 19, 44, 96, 97, 115, 119
denominación, 82, 90
dependencia, 26, 104
desarrollo ontogenético, 30, 32
Descartes, 21, 22, 97, 100, 101, 102, 115, 126
desplazamiento analógico, 80
desplazamiento conceptual, 58
diagramas de Venn, 87, 88
dimensión, 35, 45, 77, 81, 82, 91, 101
dimensión diafórica, 82
dimensión epifórica, 82
dinámica ambiental, 45
Dios, 14, 21, 24, 97, 101, 103, 117, 125
disyunción, 87
dominancia, 51
dualidad, 64, 110, 111
Duhem, 47, 96, 119, 126
ecuación de Poisson, 53
ecuaciones de transformación de Lorentz, 134
Egon Brunswik, 27
empirismo, 103
energía, 35, 37, 61, 62, 64, 65, 66, 73, 79, 80, 88, 110, 134
energía de enlace, 64
enfoque sistémico, 38, 39
entidad, 24, 33, 89, 90, 92, 93, 101, 111
epistemología, 3, 15, 25, 27, 32, 34, 83, 116
epistemología evolutiva, 27
epistemología genética, 32, 116
equilibrio, 33, 61
equilibrio termodinámico, 61
Ernst Haeckel, 27
Ernst Von Glasersfeld, 37
espacio, 25, 28, 30, 33, 51, 57, 59, 60, 66, 81, 82, 83, 84, 86, 101, 102, 108, 109, 110, 137
espín, 66, 73
esquema, 18, 29, 30, 31, 32, 39, 44, 66, 72, 90
estado, 31, 34, 37, 66, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 101, 103, 105, 106, 109, 139
estelar, 61, 62
existencia, 16, 21, 22, 24, 26, 27, 46, 49, 63, 66, 67, 75, 79, 85, 90, 94, 97, 100, 101, 103, 105, 111
éxito empírico, 3, 64, 134
éxito predictivo, 8
experiencia, 15, 17, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 37, 38, 43, 45, 64, 73, 76, 77, 83, 84, 85, 88, 91, 94, 96, 108
explanandum, 44

explanans, 45
 ficción, 128
 filosofía, 21, 48, 72, 90, 95, 97, 101, 102, 103, 104, 119, 120, 126, 127
 fluido electromagnético, 77
 forma, 10, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 38, 39, 48, 53, 61, 64, 65, 66, 67, 72, 73, 77, 80, 82, 86, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 134, 137
 fórmula de Weizsaecker, 65
 Francisco Varela, 30
 François Englert, 111
 Friedrich Max Müller, 72
 fuerza, 16, 21, 51, 56, 64, 72, 73, 75, 81, 88, 91, 92, 94, 97, 101, 103, 104, 105, 107, 109, 110, 134, 139
 funcionamiento biológico, 32, 34
 Galileo, 21, 44, 79, 84, 85, 101, 102, 123, 126, 128, 134
 George Berkeley, 117
 Gerhard Roth, 36
 gramática generativa, 52
 Grecia Antigua, 128
 Gustav Robert Kirchhoff, 61
 Heinz Von Foerster, 34
 Heisenberg, 62, 63, 64, 74, 120, 123, 126
 Herbert Spencer, 106
 hipótesis, 10, 34, 37, 46, 47, 51, 56, 75, 77, 100, 103, 104, 105, 111, 121
 historia, 3, 4, 17, 19, 31, 44, 48, 55, 88, 90, 96, 108, 127
 Humberto Maturana, 19, 30
 Hume, 118
 Ilustración, 3, 25
 imagen, 10, 14, 17, 18, 24, 37, 38, 64, 76, 91, 94, 97, 109, 110
 imposibilidad, 16, 26, 44, 63, 72
 inclusión, 74, 87
 incompatibilidad (inter)teórica, 3, 58
 inconmensurabilidad, 3, 55
 inexistencia, 26, 86
 infinito, 29, 75, 82, 137
 información, 16, 31, 43, 77, 118
 inherencia, 26
 innatismo, 32
 integración, 31, 87, 106
 intensidad de corriente eléctrica, 74
 interacción, 26, 28, 31, 32, 34, 38, 43, 51, 64, 65, 66, 76, 97, 98, 99, 116
 intersección, 87
 investigación, 10, 61, 63, 72, 74, 77, 90, 91, 111, 124, 127, 128
 John Locke, 103
 Kant, 19, 26, 27, 30, 33, 46, 115, 116, 120
 Karl M. Baer, 106
 Kepler, 21, 48, 55, 56, 97, 100
 Konrad Lorenz, 27
 Kuhn, 48, 57, 97, 120, 127
 Laudan, 48, 120
 lenguaje, 10, 33, 63, 72, 73, 74, 75, 82, 83, 87, 88, 89, 96, 99, 111, 119, 126, 128
 ley de Coulomb, 81
 ley de desplazamiento de Wien, 62
 ley de la inercia, 105, 139
 ley de Stephan-Boltzmann, 61
 ley del desplazamiento de Wien, 62
 limitación, 26
 líneas de corriente, 77
 Locke, 103, 104, 116, 127
 Lorenz, 27, 28, 116, 124
 luminosidad solar, 61
 luz, 21, 24, 36, 56, 59, 61, 62, 79, 80, 86, 90, 100, 108, 109, 126
 Malebranche, 118
 marco, 8, 75, 82, 83, 90, 98, 99, 111
 masa clásica, 57, 80
 masa einsteiniana, 80
 matemática, 10, 52, 57, 73, 75, 77, 78, 99, 100, 103, 108, 109, 111
 materia, 44, 52, 63, 64, 72, 74, 76, 80, 89, 94, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 109, 110, 111
 mecanicismo, 96, 97, 99, 100, 101, 128
 mente, 13, 16, 24, 25, 32, 43, 45, 49, 75, 94, 103, 124, 127
 metáfora, 2, 3, 4, 11, 28, 38, 70, 71, 74, 75, 76, 77, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 96, 98, 100, 102, 107, 111, 125, 126
 método científico, 21
 métrica de Schwarzschild, 3, 58, 137
 modalidad, 26, 49, 75
 modelo, 20, 21, 48, 51, 52, 53, 54, 60, 61, 62, 64, 65, 67, 76, 77, 93, 96, 97, 105
 modelo atómico, 76
 modelo de gota líquida, 65, 67
 modelo nuclear, 3, 64
 modelo nuclear de capas, 64, 67
 modelo teórico, 54
 momento, 29, 34, 36, 38, 39, 48, 54, 56, 63, 72, 73, 78, 79, 82, 86, 97
 movimiento, 21, 46, 47, 51, 56, 57, 67, 78, 79, 80, 85, 92, 93, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 138, 139
 movimiento browniano, 79
 mundo, 3, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 36, 37, 38, 43, 45, 46, 48, 49, 50, 54, 55, 57, 60, 62, 63, 64, 72, 73, 74, 79, 82, 86, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 102, 103, 105, 109, 110, 111, 116, 117, 126, 128
 mundo circundante, 28, 29, 36, 45, 88
 mutación, 34, 51, 127
 naturaleza, 15, 30, 31, 36, 38, 46, 47, 54, 61, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 82, 86, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 99, 100, 102, 103, 104, 107, 108, 110, 111, 118, 122, 126, 128, 137
 necesidad, 10, 26, 27, 31, 33, 34, 56, 89, 95, 104
 negación, 26
 Niels Bohr, 62, 76

nivel operatorio, 32
 noumenon, 19, 26
 objeto, 24, 32, 33, 46, 51, 61, 63, 64, 72, 75, 80, 82, 84, 85, 93, 103, 110, 134
 observador, 24, 26, 30, 34, 35, 36, 43, 49, 51, 63, 77, 104, 123
 paradigma, 62, 96, 97, 98
 patrón estimular, 32
 Paul Henle, 82
 Paul Watzlawick, 19, 38
 pensamiento, 3, 17, 19, 21, 23, 30, 33, 34, 47, 63, 73, 76, 82, 83, 87, 90, 93, 96, 100, 111, 126, 127
 percepción, 15, 16, 20, 21, 24, 26, 28, 29, 31, 33, 35, 36, 88, 98, 104
 Peter Higgs, 111
 phenomenon, 26
 piedra angular, 63, 111
 Platón, 20, 46, 90, 93, 95, 127
 pluralidad, 26
 Popper, 19, 48, 115, 116, 118, 120, 121, 124, 128
 posibilidad, 16, 19, 20, 26, 38, 46, 50, 75, 103
 potencial, 24, 66, 134
 potencial de Saxon-Woods, 66
 predicación, 82
 principio, 24, 36, 60, 63, 64, 79, 80, 89, 90, 94, 95, 105, 108, 109, 110, 111
 principio de complementariedad, 64, 110, 111
 principio de equivalencia, 109
 proposición, 22
 Ptolomeo, 47, 48, 121
 radiación térmica de Kirchhoff, 61
 radical, 34, 36, 64, 91, 115, 120
 razón, 14, 15, 17, 20, 21, 24, 28, 31, 34, 47, 51, 76, 77, 81, 83, 90, 91, 92, 95, 96, 97, 101, 115, 120, 121
 realidad, 3, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 23, 25, 26, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 44, 46, 49, 51, 52, 54, 57, 63, 72, 73, 76, 85, 90, 91, 98, 110, 115, 117, 118, 120, 123, 128
 realidad oculta, 45
 realismo, 19, 46, 48, 49, 50, 120
 realismo convergente, 48
 referencia, 30, 31, 49, 58, 72, 76, 79, 82, 83, 85, 98, 99, 108
 relación, 14, 15, 18, 26, 29, 30, 31, 34, 36, 37, 39, 43, 45, 57, 62, 63, 64, 72, 75, 87, 89, 91, 94, 96, 98, 100, 107
 relación de indeterminación, 63
 relatividad especial, 57, 119, 126
 relatividad galileana, 79
 representación, 9, 20, 38, 45, 52, 96, 109, 119
 retroalimentación, 8, 35
 Robert Brout, 111
 Santo Tomás, 24, 47, 116, 121
 Santo Tomás de Aquino, 24, 47
 Schrödinger, 62, 63, 66
 Schwarzschild, 137
 Segunda ley, 105
 selección natural, 107, 126
 ser, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 32, 35, 36, 38, 43, 46, 47, 48, 49, 51, 56, 57, 64, 73, 75, 77, 79, 80, 82, 83, 85, 87, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 111, 134, 138
 simetría, 65, 111
 sistema, 16, 27, 28, 30, 32, 35, 36, 37, 52, 53, 56, 57, 76, 78, 79, 81, 82, 85, 87, 93, 94, 97, 98, 99, 100, 106, 108, 110
 sistema axiomático, 53
 sistema cognitivo, 28, 45
 sistema raciomorfo, 27
 Sklar, 48, 121
 subjetividad, 18
 subsistencia, 25, 26
 sujeto, 33, 34, 64, 72
 sustancia, 26, 90, 102
 tabula rasa, 24
 temperatura, 35, 53, 61, 62, 83, 88
 tensión de cuerda, 110
 teorema, 53, 54, 77, 81
 teoría, 3, 27, 34, 35, 36, 38, 47, 48, 49, 51, 53, 55, 56, 57, 62, 73, 77, 81, 82, 87, 93, 98, 102, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 118, 119, 120, 122, 124, 126, 127
 teoría de conjuntos, 87
 teoría de cuerdas, 110
 teoría de la evolución, 38, 51, 107
 teoría de la recapitulación, 27
 teoría evolutiva del conocimiento, 27
 Tercera ley, 105
 tiempo, 25, 29, 32, 33, 39, 46, 52, 53, 54, 57, 59, 60, 61, 80, 81, 82, 84, 86, 88, 89, 92, 95, 104, 107, 108, 109, 134, 137
 totalidad, 26, 28, 31, 36, 48, 90, 91, 94, 98, 101, 103, 104, 106
 Uexküll, 3, 28, 29, 30, 32, 36, 117, 118
 Umwelt, 28, 116, 118
 unidad, 26, 30, 53, 61, 110, 134
 universalidad, 79
 universo, 17, 21, 51, 57, 66, 75, 82, 84, 86, 88, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 101, 104, 109, 118
 validez, 16, 19, 46, 86, 102
 Varela, 30, 31, 37, 116, 117, 122, 124
 velocidad, 53, 56, 59, 63, 73, 79, 80, 85, 97, 101, 102, 108, 134
 verbum mentis, 24
 verdad, 17, 20, 22, 23, 38, 48, 49, 50, 58, 60
 Vico, 25, 117, 118
 Vollmer, 117
 Worrall, 50, 122

ANEXO I

Consideremos por un momento las ecuaciones de transformación de Lorentz:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y; z' = z \\t' &= \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)\end{aligned}$$

Al ser $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, si la velocidad v de los cuerpos es mucho menor que c , las ecuaciones de Lorentz se convierten en las ecuaciones de transformación de Galileo de la mecánica clásica. Esto se debe a que $\gamma = 1$ y $vx/c^2 = 0$. Como consecuencia, algunos fenómenos relativistas como la contracción de longitudes y la dilatación del tiempo desaparecen, la segunda ley de la dinámica newtoniana se recupera y la expresión clásica de la energía cinética reaparece. En efecto, como la energía cinética relativista de una partícula se describe como:

$$E_{CR} = \gamma mc^2 - mc^2,$$

basta desarrollar el valor de γ en la forma del binomio de Newton para obtener:

$$E_{CR} = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots\right) mc^2 - mc^2 = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{3}{8} \frac{mv^2}{c^2} v^2 + \dots$$

En el límite clásico:

$$\lim_{v/c \rightarrow 0} E_{CR} = \frac{1}{2} mv^2$$

Como puede comprobarse, el éxito predictivo del MMN se manifiesta solo en velocidades y energías pequeñas, que son, precisamente, las que aparecen en las proximidades de campos gravitatorios débiles o a grandes distancias de campos gravitatorios intensos. Según el MMN, todo objeto de masa m origina a su alrededor un campo gravitatorio de intensidad $g = -G_N m/r^2$ correspondiente a la fuerza que m ejerce sobre otro objeto situado a una distancia r . La fuerza que m ejerce sobre este cuerpo dentro de este campo se describe como $F = mg$. Como la energía potencial se calcula

$$E_p = -G_N \frac{m_1 m_2}{r},$$

la expresión

$$\phi = -G_N m/r$$

de la energía potencial por unidad de masa situada en el campo gravitatorio de m denota el potencial de campo a una distancia r . Pues bien, sabiendo esto, el límite newtoniano de la mecánica relativista se obtenido con el valor límite $c \rightarrow \infty$. En el MGE, la ecuación geodésica de un cuerpo de masa m se describe como:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} &= 0, \\ \frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{00}^\lambda \frac{dx^0}{d\tau} \frac{dx^0}{d\tau} + \Gamma_{0j}^\lambda \frac{dx^0}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau} + \Gamma_{ij}^\lambda \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau} &= 0\end{aligned}$$

Sabiendo que

$$\begin{aligned}d\tau &= dt \sqrt{1 - v^2/c^2} \\ dx^0 &= c dt,\end{aligned}$$

calculamos

$$\frac{dx^0}{d\tau} = \frac{cdt}{dt\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \approx c, \text{ si } v/c \rightarrow \infty$$

$$\frac{dx^i}{d\tau} = \frac{dx^i}{dt\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \approx \frac{dx^i}{dt} = v^i, \text{ si } v/c \rightarrow 0$$

Siendo

$$\frac{d^2x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{00}^\lambda c^2 + \Gamma_{0j}^\lambda cv^j + \Gamma_{ij}^\lambda v^i v^j = 0,$$

al dividir por c^2 en el límite $v/c \rightarrow 0$, obtenemos

$$\frac{d^2x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{00}^\lambda c^2 = 0$$

Como para los índices espaciales $\lambda = i$

$$\Gamma_{00}^i \approx -\frac{1}{2} \frac{\partial g_{00}}{\partial x^i},$$

entonces,

$$\frac{d^2x^i}{d\tau^2} \approx \frac{c^2}{2} \frac{\partial g_{00}}{\partial x^i}$$

Al comprobar esta expresión con la de la mecánica newtoniana

$$\frac{d^2x^i}{dt^2} = -\frac{\partial \phi}{\partial x^i},$$

obtenemos

$$\frac{\partial g_{00}}{\partial x^i} = -\frac{2}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial x^i}$$

$$g_{00} = -\frac{2\phi}{c^2}$$

Al comparar la expresión general del tensor de Ricci:

$$R_0^0 = \frac{\partial \Gamma_{00}^i}{\partial x^i} = \frac{\partial}{\partial x^i} \left(-\frac{1}{2} \frac{\partial g_{00}}{\partial x^i} \right) = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 g_{00}}{\partial x^i} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^{i^2}} \left(-\frac{2\phi}{c^2} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{i^2}}$$

con la ecuación de campo de Einstein:

$$R_0^0 = \frac{4\pi G_N}{c^2} \mu,$$

se obtiene:

$$4\pi G_N \mu = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{i^2}}$$

$$\Delta \phi = 4\pi G_N \mu,$$

ecuación cuya solución para una única partícula de masa m es¹⁰²:

$$\phi = -G_N \frac{m}{r}$$

¹⁰² Cf. Landau & Lifshitz. (1992, pág. 391).

Al aplicar $g = -\partial\phi/\partial r$, y $F = mg$, se obtiene la ley newtoniana de la gravitación universal:

$$F = -G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ANEXO II

La métrica de Schwarzschild para un cuerpo de esta naturaleza viene dada por la siguiente expresión (Rivadulla 2003, págs. 244-249):

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{1}{c^2} \left[\frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right)} + r^2(d\vartheta^2 + \text{sen}^2\vartheta d\varphi^2) \right]$$

Si comparamos la métrica de Schwarzschild con la forma general de la componente espacial de un espacio isotrópico curvo:

$$ds^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\vartheta^2 + \text{sen}^2\vartheta d\varphi^2),$$

encontramos que

$$kr^2 = \frac{2Gm}{rc^2},$$

$$k = \frac{2Gm}{r^3 c^2},$$

describe la curvatura del espacio a una distancia r con respecto de un cuerpo compacto de masa m . Es evidente que k depende directamente de la masa m , pero siendo inversamente proporcional a r , de modo que en el infinito tiende a 0. De acuerdo con el MRE, el radio de Schwarzschild se denota por r_s y expresa la ecuación $2Gm/c^2$. En métrica de Schwarzschild, el tiempo propio $d\tau$ viene dado por

$$d\tau = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{1/2} dt,$$

En términos del radio de Schwarzschild:

$$d\tau = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{1/2} dt,$$

y en términos de frecuencia:

$$f_o \approx \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{1/2} f_e$$

Siendo los subíndices e y o la frecuencia emitida y observada, respectivamente.

ANEXO III

En su formulación original de 1909, Paul Ehrenfest analiza un disco rígido de radio R que gira con una velocidad angular constante w . Al ser w la magnitud de la velocidad relativa en cualquier punto de la circunferencia del disco, la circunferencia sufrirá la contracción de Lorentz por un factor de:

$$\sqrt{1 - \frac{(wR)^2}{c^2}}$$

Ahora bien, dado que el radio es perpendicular a la dirección del movimiento, esta no debería sufrir contracción alguna:

$$\frac{\text{circunferencia}}{\text{diámetro}} = \frac{2\pi R \sqrt{1 - \frac{(wR)^2}{c^2}}}{2R} = \pi \sqrt{1 - \frac{(wR)^2}{c^2}}$$

De ahí la paradoja, ya que, de acuerdo con la geometría euclidiana, esta debería ser π .

ANEXO IV

El primer axioma del movimiento es la ley de la inercia, según la cual todo cuerpo persevera en estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme, a menos que alguna otra fuerza lo obligue a cambiar de estado.

$$\sum_{n=1}^i \vec{F}_n = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} = 0$$

El segundo axioma sostiene que siempre que una fuerza no equilibrada actúe sobre un cuerpo, se produce una aceleración en la dirección de la fuerza que es directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa del cuerpo.

$$\sum_{n=1}^i \vec{F}_n = m\vec{a}$$

El tercer axioma determina que cuando una fuerza determinada actúa sobre un cuerpo, este reacciona con una fuerza con igual magnitud, pero en sentido opuesto:

$$\vec{p} = m\vec{v},$$

siendo p el momento lineal o cantidad de movimiento, definido este como el producto de la masa m de un cuerpo por su velocidad v .