

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Facultad de Filosofía y Letras



ESTRATEGIAS TROPOLÓGICAS EN CIENCIA

Tesis doctoral realizada por:

Israel Salas Llanas

Dirigida por:

José Pazó Espinosa

Codirigida por:

Enrique Alonso González

Madrid, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

*Programa de Doctorado en Filosofía y
Ciencias del Lenguaje*

ESTRATEGIAS TROPOLÓGICAS EN CIENCIA

Tesis doctoral realizada por:

Israel Salas Llanas

Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

israel.salas@predoc.uam.es

Dirigida por:

Dr. José Pazó Espinosa

Profesor de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

Dept. de Filología Española

jose.pazo@uam.es

Codirigida por:

Dr. Enrique Alonso González

Profesor de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

Dept. de Lingüística, Lenguas Modernas, Lógica y Filosofía de la Ciencia

enrique.alonso@uam.es

A quienes ven la ciencia como la metáfora más hermosa.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	11
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I. CONSTRUCTIVISMO: BREVE ANÁLISIS DOXOGRÁFICO DE SU DESARROLLO HISTÓRICO.....	23
1. INTRODUCCIÓN	27
2. CONSTRUCTIVISMO: ANÁLISIS Y SÍNTESIS.....	29
2.1. El hombre y la realidad: El problema de la percepción.....	29
2.2. Constructivismo <i>versus</i> solipsismo	31
2.3. Cognición y conocimiento.....	32
2.4. Interacción social y comunicación	33
2.5. Consecuencias de una visión constructivista del mundo	34
3. EL CONSTRUCTIVISMO EN LA HISTORIA DEL PENSAMIENTO OCCIDENTAL	36
3.1. El constructivismo en la antigüedad	36
3.2. El constructivismo en el Renacimiento	39
3.3. El constructivismo en la Ilustración.....	48
3.4. El constructivismo en el siglo XX.....	51
3.4.1. <i>El constructivismo en el siglo XX: La teoría evolutiva del conocimiento</i>	51
3.4.2. <i>El constructivismo en el siglo XX: Jakob J. Von Uexküll y el mundo</i> <i>circundante</i>	53
3.4.3. <i>El constructivismo en el siglo XX: Jean Piaget y los inicios de la</i> <i>epistemología genética</i>	59
3.4.4. <i>El constructivismo en el siglo XX: El paradigma cibernético y el</i> <i>constructivismo radical</i>	64
4. CONCLUSIÓN.....	73
CAPÍTULO II. CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO	76
1. INTRODUCCIÓN	79
2. DEL REALISMO AL CONSTRUCTIVISMO CIENTÍFICO	80

3. CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO: EL PAPEL DEL OBSERVADOR EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA	88
4. MODELOS (MATEMÁTICOS) EN CIENCIA	94
4.1. Los límites de la modelización en ciencia	100
4.1.1. <i>Los límites de la modelización en ciencia: El mundo físico no funciona como un sistema axiomático</i>	100
4.1.2. <i>Los límites de la modelización en ciencia: El ajuste funcional de un modelo es gradual</i>	102
4.1.3. <i>Los límites de la modelización en ciencia: Los modelos no son fieles representaciones de la estructura del mundo</i>	103
4.2. Éxitos y fracasos de los modelos en ciencia.....	105
4.2.1. <i>Los casos límites y el problema de la inconmensurabilidad</i>	105
4.2.2. <i>El problema de la incompatibilidad (inter)teórica: Schwarzschild y los agujeros negros</i>	111
4.2.3. <i>El paradigma cuántico</i>	119
4.2.3.1. <i>El triunfo predictivo del modelo de cuerpo negro</i>	123
4.2.3.2. <i>El éxito empírico de los modelos nucleares: El modelo de gota líquida y el modelo nuclear de capas</i>	126
5. CONCLUSIÓN.....	133
CAPÍTULO III. ANALOGÍA Y METÁFORA EN CIENCIA	137
1. INTRODUCCIÓN	141
2. ANALOGÍAS, METÁFORAS Y MODELOS EN CIENCIA	146
3. ANALOGÍA.....	152
3.1. La analogía en ciencia: La radiación del cuerpo negro	155
3.2. La analogía en ciencia: El efecto fotoeléctrico	157
3.3. La analogía en ciencia: La teoría de la relatividad.....	157
4. METÁFORA	169
4.1. El valor gnoseológico de la metáfora en ciencia	172
4.1.1. <i>El valor heurístico de la metáfora</i>	173
4.1.2. <i>El valor catacrético de la metáfora</i>	175

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*

AGRADECIMIENTOS

Desde que tengo uso de razón, siempre he pensado que el atractivo de la filosofía residía en su poder para establecer bellas relaciones entre las cosas. No es una mera disciplina académica, como muchos quieren hacernos creer: es una dimensión humana. Ni todos los licenciados en filosofía son filósofos ni todos los filósofos son licenciados en filosofía. Conforme vamos construyendo esas relaciones descubrimos que la física constituye la base de la química, la química de la biología, la biología de la psicología, esta última de la sociología... Y así, poco a poco, como si de un hilo de Ariadna se tratase, la filosofía nos permite conciliar todos y cada uno de los contenidos emanados de las diferentes disciplinas y saberes científicos dentro del marco general del conocimiento.

Pero, claro... luego llega la universidad, y con ella uno se ve obligado a renunciar a ser ese «pensador intruso¹», a desprenderse de esa visión global, de conjunto, y a focalizar su atención en aspectos concretos de un campo de estudio cada vez más acotado. Desde mi primer día en la universidad, muchos fueron los profesores que transitaban las aulas de la Facultad de Filología de la Universidad de Sevilla. Algunos daban clase, otros repetían de memoria el temario, otros exigían tomar apuntes de forma desenfadada, otros exponían los contenidos de su materia de forma magistral, y otros... enseñaban. Y entre esos profesores que enseñaban, que eran capaces de avivar la llama de la curiosidad y el asombro, del placer por estudiar e interesarse por cómo funciona el mundo, de hacerte recuperar esa devoción incondicional hacia el conocimiento que durante tantos y tantos años el instituto se preció en destruir, ...uno era un pensador intruso.

Desde su primera clase, este profesor consiguió cambiar por completo mi modo de entender no solo el lenguaje, sino el mundo en su conjunto. No podía dejar de preguntarme: «Pero si esto es Introducción a la Lingüística, ¿por qué nos habla del universo? ¿Y del hombre? ¿Y de su evolución?». Y entonces me di cuenta: el lenguaje lo abarca todo. Su clase concluyó con: «¿Qué es la ciencia sino el lenguaje

¹ Cf. Wagensberg (2018).

que utilizamos para comunicarnos con el universo?». Este profesor es Francisco José Salguero-Lamillar, quien se merece con creces mi más profundo primer agradecimiento. Gracias, profesor. Gracias por todo lo enseñado y compartido.

Desde aquel día no tuve ninguna duda de que quería ser lingüista. O, mejor dicho, quería saber tanto como él. Quería ser capaz de encontrar esas bellas relaciones que conectan todos y cada uno de los distintos aspectos del mundo: el lenguaje con el cosmos, con el hombre, con el pensamiento, con la inteligencia artificial... Recuerdo una clase en la que pasó de hablar de la metáfora a hablar de *Desafío total*², una de mis películas favoritas de la infancia. ¿Cómo es posible algo así? ¿Acaso la metáfora juega algún papel en nuestro modo de interpretar y representar el mundo que nos rodea? Al fin y al cabo, la metáfora encierra ese tipo de razonamiento analógico, ese modo de acercarnos al mundo a través de bellas relaciones. Quizá fuera esa la respuesta... y estaba en el propio lenguaje.

Al finalizar la licenciatura, y tras haber cursado una estancia Erasmus en la Universidad Metropolitana de Mánchester, me matriculé en un máster en Lengua Española en la Universidad Autónoma de Madrid. Una vez allí, tuve la oportunidad de conocer a un profesor radicalmente distinto en su modo de acometer la docencia. Sus clases magistrales y su modo de exponer los contenidos me llevaron a proponerle que tutelara mi trabajo final de máster. Aceptó, y, unos meses después, se comprometió a dirigirme la tesis. Este profesor es José Pazó Espinosa, y por ello, por todo cuanto me ha enseñado y sigue enseñándome, se merece mi más sincero segundo agradecimiento. Muchas gracias, José.

Al finalizar el máster, decidí cursar otro, esta vez en Lógica y Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Salamanca, con idea de ampliar mi formación como lingüista desde un enfoque no tan filológico y sí más filosófico. ¡Un pequeño salto para ese pensador intruso! De la Lingüística a la Filosofía. La experiencia fue realmente grata, pues esta me brindó la oportunidad de estudiar algunos aspectos relacionados con lenguaje que no había abordado durante mis años de

² Título original: *Total Recall* (1990).

licenciatura: la lógica, la referencia... la verdad. No dudé en matricularme ese mismo año en el programa de doctorado en Filosofía y Ciencias del Lenguaje en la Universidad Autónoma de Madrid con José Pazó como director de tesis y Enrique Alonso González como codirector. La razón por la que decidí contactar con Enrique se debió al interés que me suscitaban los títulos de sus trabajos: «Viajes al interior del tiempo», «Lógicas del significado», «Modelos naturales de la autorreferencia». ¿Quién puede no sentirse atraído por títulos así? Mi más profundo tercer agradecimiento a Enrique. Gracias por toda la ayuda prestada durante todos estos años.

Finalmente, llegué a concretar todos y cada uno de los aspectos en torno a los que iba a articular mi tesis doctoral. Sorprendentemente, el tema despertó la curiosidad de un profesor de la Universidad de Osaka, lo que me permitió cursar un año de estancia en dicha institución bajo la figura de investigador predoctoral. Este profesor es Yasuo Nakayama, a quien va dirigido este cuarto agradecimiento: *Iroiro arigato*.

Mi primera toma de contacto con la Universidad de Osaka fue reveladora. Nada más llegar, me presentaron al resto de compañeros de departamento en mitad de un seminario en el que se entrecruzaban interpretaciones enfrentadas sobre el principio de Copenhague, un tema que a nivel analítico me resultaba bastante complejo. En ese momento me di cuenta de que debía ponerme las pilas con una infinidad de lecturas, algunas de ellas difíciles de deglutir, ya que exigían de otras muchas lecturas previas. ¡Otro pequeño salto para ese pensador intruso! Esta vez a la Física. Con prudencia, sobrevolaba el territorio fronterizo que conecta el mundo físico con la metáfora. Un reto difícil que fue posible gracias a la incondicional ayuda de mis compañeros de departamento. Mi más profundo agradecimiento a todos ellos; en especial a Sho Fujita, quien tanto me auxilió con mis problemas con las matemáticas (¡malditas matemáticas!); Wataru Sasaki, por ser mi guía académico durante mi estancia en tierras niponas; y Tora Koyama, por todas aquellas divagaciones metafísicas que manteníamos dentro y fuera del aula...y que a día de hoy aún tienen sentido.

Por último, quiero dar las gracias también a Eduardo Bustos Guadaño, quien tuvo la amabilidad de ser mi tutor académico durante mi estancia en la Universidad de Salamanca. Eduardo es quizá la persona que más sabe sobre metáfora que he conocido nunca.

Asimismo, a todos aquellos profesores y colegas universitarios que de un modo u otro han contribuido a que llegara hasta aquí: ¡Gracias! Ellos saben quiénes son.

Ahora, tras más de una década de trayectoria académica a lo largo de seis universidades, tres nacionales –Universidad de Sevilla, Universidad Autónoma de Madrid y Universidad de Salamanca– y tres extranjeras –Manchester Metropolitan University, Saint Louis University y Osaka University–, puedo presentar este trabajo, el que considero mi legado como estudiante universitario.

Espero que lo disfruten.

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES DE LA CUESTIÓN Y OBJETIVOS PROPUESTOS

Como filosofía de la ciencia, el constructivismo obedece a un sistema de pensamiento que centra su atención en el examen de las estructuras y procesos cognitivos que intervienen en la rigurosa interpretación del acometer científico, en las estrategias metodológicas utilizadas en la investigación y en los propios resultados obtenidos. Esta corriente 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 cuyo imperativo biológico persigue el ajuste y la viabilidad.
- La cognición sirve a la organización del mundo experiencial del observador y no al descubrimiento de una realidad presuntamente objetiva.
- El cerebro humano, así como cualquier sistema de observación particular más o menos evolucionado, es autorreferencial y organizacionalmente cerrado, por lo que solo puede recurrir a sus propios recursos cognitivos para asignar significado, ya que este organiza las unidades sensoriales sobre la base de experiencias e interpretaciones anteriores.
- La facultad de operar cognitivamente sobre nuestras propias experiencias 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 comparten intereses similares. Ambos dominios pueden describirse 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 representativa y

la dinámica del desarrollo teórico, respectivamente. Cada uno de estos dos sistemas –ciencia y cognición– busca generar un marco de interacción adecuado que garantice, en el caso de la ciencia, el éxito predictivo a partir de los modelos utilizados en la investigación y, en el caso de la cognición, una amplia gama de estrategias funcionalmente exitosas con las que salvar la distancia entre el mundo físico y la dinámica interna representativa del propio sistema. Al igual que ocurre con las estructuras y procesos que conforman nuestro sistema cognitivo, los modelos en ciencia se encuentran limitados por su propia estructura interna, así como por su dinámica operativa. Esta puesta en relación entre la ciencia y la cognición hacen del constructivismo un sistema de pensamiento idóneo con el que acometer el estudio de la modelización desde una perspectiva cognitiva, ya que permite establecer una serie de puntos de continuidad entre ambos dominios.

Cognición	Modelización
La arquitectura cognitiva del sistema de observación impone los límites últimos a la hora de representar la realidad.	La estructura teórica del modelo limita su capacidad predictiva y su dominio de aplicabilidad.
La representación obedece al resultado de la dinámica interna del propio sistema y no a un mapeado especular del mundo.	Los modelos no funcionan como cartografías referenciales acerca de cómo es el mundo, sino como abstracciones matemáticas con las que intervenir en este a partir del cálculo y la predicción.
El mundo responde a un acto de construcción activo por parte del observador.	El mundo queda reducido a las hipótesis de partida y al alcance predictivo de las mismas.
Toda referencia a una realidad independiente situada más allá del horizonte cognitivo de todo sistema de observación responde a una especulación metafísica.	Los modelos no asumen valor metafísico alguno.

La cognición asume carta de naturaleza adaptativa cuyo imperativo biológico persigue generar un comportamiento funcionalmente exitoso con el medio que garantice la supervivencia del sistema.	Los modelos buscan acometer el estudio del mundo físico a partir de la viabilidad predictiva de sus postulados, o lo que es lo mismo, de su estructura teórica.
--	---

Durante la fase de observación, nuestro sistema cognitivo aísla estados, transiciones y correlaciones que considera relevantes para sistematizar las regularidades y patrones de comportamiento observados en el entorno. En primer lugar, nuestros órganos sensoriales traducen los estímulos ambientales a un lenguaje neural estándar con el que el cerebro opera. 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 de construcción, el sistema, tanto a nivel sensorial como neuronal, construye de acuerdo a su arquitectura cognitiva 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 formulación matemática.

Los modelos en ciencia obedecen al resultado de esta formulación matemática del mundo. 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 con las que intervenir en el mundo físico a

partir del cálculo y la predicción se tratasen. Podría decirse que, desde una perspectiva cognitiva, los modelos hacen las veces de prolongaciones exosomáticas de nuestros sentidos al permitirnos formalizar matemáticamente distintos aspectos del mundo y facilitar nuestra intervención predictiva en este de forma exitosa. De este modo, y en contraposición al representacionalismo tradicional, el constructivismo apela a la viabilidad predictiva de un modelo, 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 correspondencia entre un modelo y el mundo como una relación de equivalencias funcionales y no como una fiel representación de cómo el mundo es realmente. En este sentido, el constructivismo busca modular el talente epistemológico de la ciencia, desestimando la noción heredada de conocimiento y sustituyéndola por la de una ordenación de campos cada vez más amplios de experiencia. La idea de alcanzar una explicación metafísica sobre cómo es el mundo se ve sustituida por la de desarrollar una serie de estrategias funcionales que faciliten la manipulación y el control a partir de la modelización. Los modelos en ciencia encuentran su justificación epistemológica en el constructivismo, donde el éxito de un modelo se adscribe a las categorías de viabilidad y funcionalidad, siendo el conocimiento el resultado de la construcción de relaciones funcionales entre el mundo físico y su formalización matemática con ánimo de satisfacer una meta predictiva.

Siendo así, al poner en relación dominios –ciencia y cognición–, el constructivismo se cuestiona qué mecanismos y procesos cognitivos intervienen 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, la analogía y la metáfora asumen un papel crucial en la investigación científica, y más concretamente en 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 matemático se nutre de los

datos extraídos de la experimentación y se configura conforme a las impresiones sensoriales captadas en la fase de observación, fase en la que el razonamiento analógico y el pensamiento metafórico hacen su aparición. Asimismo, este lenguaje matemático, 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 cognitivas clave con las que vertebrar una imagen coherente y predictivamente 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 extraer bajo un denominador común las premisas sobre las que esta corriente de pensamiento se asienta.
- Situar al observador como la piedra angular durante la fase de observación dado su papel determinante en la captura de regularidades y patrones de comportamiento en el mundo físico, en la ulterior recogida de datos y formalización teórica.
- 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.
- Examinar el papel que asumen la analogía y la metáfora durante la fase de modelización.

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 ordenar los contenidos de forma clara y

ordenada. El primer capítulo: CONSTRUCTIVISMO: BREVE ANÁLISIS DOXOGRÁFICO DE SU DESARROLLO HISTÓRICO, recupera a partir de una meticulosa doxografía algunos de los planteamientos y contribuciones que allanaron el sendero a la posterior aparición de la filosofía constructivista, desde su origen en la antigua Grecia hasta la consolidación de su versión más radical a comienzos del siglo XX.

En el segundo capítulo: CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO, examinaré algunos de los problemas más acuciantes en el debate filosófico actual en torno al fenómeno de la modelización, como el problema de la inconmensurabilidad, la compatibilidad interteórica y los casos límites. Para ello, contrapondré el constructivismo al realismo científico, analizando cada una de las premisas teóricas sobre las que ambas corrientes se erigen, y así mostrar cómo los modelos en ciencia, pese al enorme éxito predictivo que puedan presentar sus postulados, no deben pensarse como fieles descripciones de cómo es el mundo, sino como estrategias funcionalmente exitosas con las que salvar la distancia entre este y su formalización matemática.

Con ánimo de refrendar empíricamente lo anterior, procederé en primer lugar a contrastar los postulados que rigen el Modelo Mecanicista de Newton [MMN] frente a los que integran el Modelo Relativista de Einstein [MRE] –este último, tanto en su versión especial [MR-E] como en su versión general [MR-G]–, y así mostrar que, al atribuir cada uno una significación distinta a las entidades teóricas sobre las que operan, no es posible conciliar desde un punto de vista semántico diálogo posible entre ambos modelos. En segundo lugar, me aventuraré en el dominio de la microfísica para contrastar dos modelos nucleares –el Modelo Nuclear de Gota Líquida [MNGL] y el Modelo Nuclear de Capas [MNC]– y mostrar que, pese al éxito predictivo que ambos modelos presentan por separado, sus postulados teóricos se muestran incompatibles entre sí, por lo que resulta lógicamente ilegítimo señalar ninguno de ellos como fieles representaciones del núcleo atómico y sí como herramientas parcialmente exitosas con las que estudiar el mundo cuántico desde diferentes perspectivas.

Finalmente, en el tercer y último capítulo: ANALOGÍA Y METÁFORA EN CIENCIA, analizaré el valor gnoseológico de la analogía y la metáfora en ciencia, así como el papel que ambas estrategias cognitivas asumen durante la investigación científica, y más concretamente durante fase de modelización.

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 el viento?». Sin tan siquiera mirar 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 un excéntrico millonario con un largo y oscuro pasado: Conchis. Este enigmático personaje narra a Nicholas dos historias dramáticas: la primera sobre un rico coleccionista de arte cuyo castillo quedó destruido una noche por el fuego 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 se incendió el castillo de aquel coleccionista, el campesino presenció su tan esperanzada visión. Sorprendido ante la coincidencia que presentaban ambos acontecimientos, 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 se establece entre el conocimiento que uno tiene 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 se da cuenta de 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 mostrar 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 lo ofrece el “Teatro Mágico” de Hermann Hesse. En su obra, Harry Haller 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, Harry se topa con un cartel luminoso con letras pálidas y parpadeantes que reza:

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

A lo largo de su desesperada búsqueda por encontrar el teatro, tienen lugar un sinnúmero de encuentros y vivencias singulares que ponen en duda cada vez más 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 hablar de una realidad más allá de mis propias atribuciones subjetivas? Es más, si la realidad observada cambia según el observador, el lenguaje utilizado para describirla también debería cambiar, ¿no sería 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 obedece al resultado de una construcción activa del mundo y, en segundo, en que la función de la cognición es de naturaleza adaptativa. Ante tales premisas, el constructivismo plantea interesantes cuestiones relativas a la relación que se establece entre nuestro conocimiento del mundo y cómo el mundo es realmente.

2.1. El hombre y la realidad: El problema de la percepción

El constructivismo no es una ontología, sino una epistemología; es decir, como corriente filosófica, este centra su atención en la relación entre el hombre y el mundo y no en la presunta naturaleza objetiva de 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 con nuestra experiencia.

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 del modo siguiente: «La percepción es [...] una asignación de significado al significado de los procesos neuronales libres, a la construcción y la interpretación³» (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 puedan adquirir la significación que les ha sido asignada por las estructuras y procesos cognitivos involucrados en el proceso de decodificación de la información 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

³ La traducción es mía.

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 aún 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 en la dinámica interna pueden considerarse fieles descripciones de cómo el mundo es realmente.

2.2. Constructivismo *versus* 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. El solipsismo (del latín [*ego*] *solus ipse*), a diferencia del constructivismo, responde a un planteamiento filosófico que afirma 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 parte de los estados mentales del propio yo que, a su vez, es la única realidad tangible.

El solipsismo recobró fuerza como una variante extrema del subjetivismo cartesiano. En *La vida es un sueño*, Calderón de la Barca ilustra este pensamiento 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 su origen también 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 sobre el mundo es objetivo. Este presunto conocimiento objetivo pervive como un pálido reflejo de nuestra historia, de una época en la que nuestros antepasados creían estar en lo cierto cuando sostenían 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

dudar de la imagen imperante del mundo en aquella época, no solo ilustra nuestra firme impotencia ante contradicciones que pueden volverse obvias con nuevas experiencias, sino también la tendencia más humana a pagar cualquier precio por 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 experiencia 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, nuestra capacidad para percibir contradicciones o incoherencias y resolverlas y, en segundo lugar, nuestro carácter social; este último ligado a la tesis aristotélica del hombre como *zoon politikón*⁴ (del griego ζῷον 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*

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).

realidad?, Watzlawick considera que la relación entre dos observadores es siempre más compleja que la mera suma de las características particulares de ambos por separado. En este sentido, afirmar 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. Sin embargo, dado que no somos conscientes de la subjetividad de estos esquemas, generalmente tratamos de adaptar el comportamiento de los demás a nuestro propio esquema de la realidad. Si, por el contrario, nos encontramos con alguien que asuma un esquema de interpretación diferente al nuestro, automáticamente trataremos de encontrar una explicación compatible con nuestro propio esquema; aunque para esa otra persona, su esquema del mundo sea absolutamente acertado.

En el trato con personas procedentes de otras culturas, generalmente somos conscientes de antemano de las dificultades que pueden surgir; es decir, esperamos algunos malentendidos, en particular si tratamos con culturas muy diferentes a la nuestra. Estos malentendidos surgen del hecho de que cada individuo se reafirma en su imagen preestablecida del mundo. Debido a las construcciones particulares de ambas partes, el comportamiento y las expectativas resultantes se influyen mutuamente. Podría decirse que un cierto nivel de objetividad que involucre una relación de dos o más partes es siempre más complejo que los fenómenos individuales involucrados, ya que este solo podría adquirirse al intentar observar una situación como un todo y no tomando en cuenta cada uno de los factores aislados.

2.5. Consecuencias de una visión constructivista del mundo

Para el constructivismo, el conocimiento no responde a una descripción literal de cómo el mundo es realmente, sino a una búsqueda infinita de diferentes

formas viables con las que intervenir en este de forma exitosa (Glaserfeld 1981). Dado que estamos limitados por el alcance sensorial de nuestros sentidos y dado que el cerebro funciona como un sistema cerrado que organiza las unidades sensoriales de forma independiente asignando significado a las sensaciones sobre la base de experiencias anteriores, la realidad no puede definirse sino como una construcción cerebral; no obstante, sabiendo 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 creamos que nuestras construcciones del mundo reflejan la realidad en su forma objetiva, 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 gracias a nuestro desarrollo en el seno de una comunidad.

Algunos autores (Glaserfeld 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 corrientes 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

⁵ Este imperativo ético de Foerster responde a una reformulación del imperativo categórico kantiano: «[P]or 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).

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 un aumento del número de elecciones y, por consiguiente, la posibilidad de aceptar la responsabilidad de las propias acciones 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 ya rechazaban abiertamente cualquier pretensión de universalismo, realismo o validez objetiva afirmando que la realidad percibida no es más que una forma más o menos coherente de entender el mundo. A continuación, recuperaré algunos de los planteamientos filosóficos más influyentes que contribuyeron 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 a comienzos del 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 más diversos campos, 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 corriente de pensamiento pueden rastrearse hasta los albores del pensamiento griego, siendo Alcmeón de Crotona (siglo VI a.C.), Heráclito de Éfeso (siglo VI a.C.), Jenófanes de Colofón (siglo VI a.C.), Demócrito de Abdera (siglo V a.C.) o el propio Protágoras (siglo V a.C.)

algunos de los precursores más relevantes de esta forma de abordar el conocimiento.

Ya en el siglo VI a.C., Jenófanes de Colofón (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 para hacerlos más asequibles a su comprensión del mundo 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 pensadores presocráticos. Tal fue el caso de Demócrito, quien sostuvo que «conocer lo que es cada cosa en realidad es imposible» (Demócrito, cit. Bernabé 2001, pág. 285); Protágoras (ca. 485–411 a.C.), quien, a través de su principio *Ánthrōpos métron*⁶ («el hombre es la medida»), sugirió que la realidad responde tan solo a aquello que se manifiesta en la propia conciencia⁷; y el propio Heráclito (ca. 535–484 a.C.), quien dio cuenta de la

⁶ Según Sexto Empírico, la cita figuraba en la obra perdida de Protágoras *Los discursos demoleedores*, 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 sostuvo que el conocimiento tenía lugar dentro del hombre, quedando este

mutabilidad del mundo; este último, al igual que la historia del hombre, se encuentra en continuo cambio, en un devenir permanente, por lo que no es posible dar cuenta de un principio absoluto que rija un mundo en constante transformación.

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

constreñido a la experiencia individual y construido gracias a los sentidos y contenidos de la memoria.

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 la forma 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, una corriente de pensamiento que recuperaba algunos principios protagóricos de la escuela sofista y que concebía al ser humano como medida de todas las cosas. Asimismo, 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

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. Pese a que sus contribuciones en el campo de la astronomía no fueron aceptadas en su tiempo, sus ideas fueron recuperadas años después por algunos autores, como fue el caso del astrónomo babilonio Seleuco de Seleucia (ca. 190 a.C.).

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 abrió la puerta a una sociedad abocada a una modernidad ligada a una 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 el padre del racionalismo y epígono por excelencia de su época, Descartes 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*¹⁰ (“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

¹⁰ Aunque la locución latina *Cogito ergo sum* se atribuye comúnmente a Descartes, existen antecedentes de esta en autores como Agustín de Hipona (354–430 d.C.): «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» [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] (Agustín de Hipona, cit. Holmes 1843, pág. 394); o Gómez Pereira (1500–1558): «Nosco me aliquid noscere: at quidquid noscit, est: *ergo ego sum*» [Conozco que yo conozco algo, y todo lo que conoce es, por tanto, yo soy]. La traducción y cursivas son mías.

verdaderas, y que sólo hay alguna dificultad en notar cuáles son las que concebimos distintamente (Descartes 2011c, pág. 124).

El *cogito* cartesiano se reveló como una renovada reformulación del dualismo platónico, según el cual existe un mundo inteligible, morada de las ideas y modelos a partir de los cuales se construyen las entidades físicas, y un mundo tangible, percibido por los sentidos, caracterizado este por ser el mundo de las entidades físicas y por su carácter temporal, espacial y mutable. Esta demarcación platónica entre estos dos mundos sirvió a Descartes como eje central para su distinción entre *res extensa* y *res cogitans*, la primera relativa a la idea platónica de la corporeidad, vinculada con el mundo tangible, y la segunda relativa al pensamiento. Así como en Platón, el *cogito* cartesiano también se muestra feudatario de la filosofía ockhamista, cuyo artífice, Guillermo de Ockham (1285 - 1347), adelantándose a Descartes, propugnó la idea de que si un observador 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. Este planteamiento fue retomado posteriormente por Descartes en sus *Meditaciones metafísicas*¹¹:

Aunque me veo en la obligación de confesar que, de todas las opiniones a las que en otro tiempo les he otorgado crédito como verdaderas, no hay

¹¹ 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 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 juicio: «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). 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.

ninguna de la cual no pueda ahora dudar, no por alguna falta de consideración y por ligereza, sino por razones muy fuertes y consideradas con mucha madurez: de manera que si deseo encontrar algo constante y firme en las ciencias, es necesario que suspenda en adelante mi juicio acerca de tales pensamientos, y que no les otorgue más crédito del que les otorgaría a cosas que me parecieran evidentemente falsas [...] Supondré entonces que hay, no un verdadero Dios que es fuente soberana de verdad, sino un cierto genio maligno, no menos astuto y engañoso que poderoso, que ha empleado toda su destreza para engañarme. Pensaré que el cielo, el aire, la tierra, los colores, las figuras, los sonidos y todas las cosas exteriores que vemos no son más que ilusiones y engaños, de los cuales se sirve para sorprender mi credulidad. Me consideraré a mí mismo como si no tuviera manos, ni ojos, ni carne, ni sangre, como si no tuviera sentido alguno, pero creyera erradamente tener todas esas cosas (Descartes 2011b, págs. 168-169).

Pero pese al enorme impacto que tuvo el racionalismo cartesiano en su época, el filósofo napolitano Giambattista Vico (1668 - 1744), considerado por muchos como el padre del constructivismo, se opuso firmemente a la idea de que el *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. Como alternativa, Vico introduce su principio *Verum ipsum factum* («La verdad es hacerlo»), con el que sostiene que la única verdad cognoscible radica en la propia experiencia y 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 vida y su propia historia los únicos dos dominios de conocimiento a los 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 esta idea no es, en cualquier caso, en términos históricos, originaria de Vico, pues ya Aristóteles deja constancia de ella 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 [*tábulas rasas*], esto es lo que sucede con el intelecto (Aristóteles 1988b, pág.101).

Así como Aristóteles, el filósofo y médico de origen persa del siglo XI, Avicena (ca. 980-1307), a quien sus discípulos denominaban *Cheikh el-Raïs* («El Príncipe de los Sabios»), reformuló el planteamiento 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).

¹² La traducción es mía.

Siglos después, Santo Tomás de Aquino (1225–1274) recupera esta idea de *tábula rasa* para afirmar 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, por lo que es necesario que dicha entidad sea percibida por los sentidos produciendo 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 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 y Santo Tomás, así como por el propio Vico, sobre la posibilidad de si la mente es o no una *tábula rasa* [*in qua nihil est scriptum*] avivaron la curiosidad de los más influyentes empiristas de su tiempo. Tal fue el caso de John Locke (1632 - 1704), quien apeló 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

¹³ La traducción es mía.

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, Santo Tomás llega a la conclusión de que la única vía para alcanzar ese tipo de conocimiento ha de ser por analogía, ya que la percepción sensorial de dichas entidades resulta imposible en este plano de existencia.

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 incomprendible. Esto lo puedo resolver sólo por la buena disposición de Dios, cuyas vías nos rebasan¹⁵ (*Op. cit.*, pág. XXXV).

Al igual que Locke, George Berkeley (1685 - 1753), filósofo empirista de origen irlandés, desde una visión inmaterialista del mundo, parte de la premisa de que el mundo tangible responde a las ideas que Dios transforma en manifestaciones sensibles para nuestra percepción.

Para aclarar la naturaleza, es inútil aducir cosas que no son ni evidentes a los sentidos ni inteligibles a la razón. Veamos, entonces, qué es lo que los sentidos y la experiencia nos dicen y cuáles son las razones que los apoyan. Hay dos clases supremas de cosas, cuerpo y alma. Con la ayuda de los sentidos conocemos la cosa extensa, sólida, móvil, figurada y dotada de otras cualidades que recogen los sentidos, pero la cosa que siente, que percibe, que piensa, la conocemos mediante cierta conciencia interna¹⁶ (Berkeley 2012, pág. 614).

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 La traducción es mía.

En esta apreciación, Berkeley no solo coincide con Locke, sino también con las ideas expuestas por Nicholas Malebranche, para quien la imposibilidad de conocer las entidades materiales que causan nuestras percepciones se debe a que el único acceso del que disponemos para conocer una entidad es la percepción que dicha entidad proyecta en nosotros.

Muestro aquí mi razonamiento. Es el color por lo que los objetos son visibles, vemos y distinguimos la diversidad de los objetos únicamente por la variedad de colores. Pero, cuando observamos los cuerpos, es la idea de extensión la que nos modifica con distintas sensaciones de color, y esta idea se encuentra en Dios. Así pues, es evidente que vemos en Dios toda esa variedad de cuerpos de los que tenemos sensaciones tan distintas, porque, si bien es cierto, no vemos para nada los objetos en sí mismos¹⁷ (Malebranche 1972, pág. 76).

Otra de las contribuciones más notables de Berkeley al posterior desarrollo de la filosofía constructivista fue su principio *Esse est percipi* (“Ser es ser percibido”), introducido por vez primera en su *Tratado sobre los principios del conocimiento humano*¹⁸:

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 conocido¹⁹ (Berkeley 2002, pág. 13).

Con este principio, Berkeley apela a la idea de que el mundo solo existe a través del acto de percepción, limitando todo conocimiento al ámbito de lo mental y

¹⁷ La traducción es mía.

¹⁸ Tanto *De Antiquissima Italorum Sapientia* de Vico como *Tratado sobre los principios del conocimiento humano* de Berkeley fueron publicadas 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.

¹⁹ La traducción es mía.

afirmando que el mundo tangible tan solo obedece a las ideas que Dios transforma en manifestaciones sensibles para nuestra percepción²⁰.

La filosofía empirista sirvió como una saludable crítica a la razón, delimitándola y restringiendo sus posibilidades a la propia experiencia. Al situar la experiencia como la única vía de acceso para conocer el mundo, el empirismo adquirió una innegable importancia en el desarrollo de la filosofía 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 las aportaciones 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

²⁰ Esta idea ya había sido promulgada anteriormente por otros autores, como es el caso de Nicholas Malebranche, quien, en 1674, sostiene: «Aun cuando diga que observamos en Dios las cosas materiales y sensibles, es preciso tomar muy en cuenta que no digo que tengamos en Dios las sensaciones, sino sólo que es Dios quien actúa en nosotros, pues Dios conoce bien las cosas sensibles, pero no tiene sensación de ellas. 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 y Él la puede causar, aunque no la tenga, pues ve, en la idea que tiene de nuestra alma, que ella es apta para tenerla. Con respecto a la idea que se encuentra unida a la sensación, ella está en Dios y nosotros la vemos porque Él tiene a bien descubrirla para nosotros unirla a la idea cuando los objetos están presentes a fin de que creamos que esto es así y que adoptemos los sentimientos que debemos tener con respecto a ellos» (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 mundo²¹.

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.

²¹ 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.

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 con el que opera el observador, siendo este último el que pone en interacción el mundo interpretado —*phenomenon*—, la única realidad accesible, y el mundo físico —*noumenon*—, situado 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 nuestro sistema de observación, es decir, nuestra arquitectura cognitiva, operan sobre la base de unos principios explicativos con carácter universal que organizan todo el flujo de la experiencia en secuencias temporales y esquemas espaciales, así como en una serie de categorías²² necesarias para la unidad sintética del pensamiento.

A partir de Kant surge una nueva concepción que atribuye al observador un papel determinante en la construcción del conocimiento. Es el observador el que contribuye a construir la realidad a partir de un conjunto de categorías heredadas. Por primera vez, el observador no crea sus propias leyes a partir del

²² 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—.

mundo físico, sino que se las impone. 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

3.4.1. El constructivismo en el siglo XX: La teoría evolutiva del conocimiento

En 1866, el biólogo alemán Ernst Haeckel (1834–1919) dio a conocer su tesis de la recapitulación²³, una propuesta con la que buscaba demostrar que «la ontogenia es una breve y rápida recapitulación de la filogenia²⁴» (Haeckel 2016, pág. 66). Esta tesis parte 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 orientando al estudio de los patrones adaptativos de los seres vivos con el medio ambiente, incorporando las funciones mentales de dichos organismos al propio proceso. 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 *habitat natura*.

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),

²³ 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.

²⁴ La traducción es mía.

quien fue el primero en postular la existencia de un subconsciente cognitivo gracias al cual el aprendizaje se hace posible. A este subconsciente lo denominó sistema racionomorfo, término que tomó prestado 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 mundo²⁵.

Al igual que Kant, Lorenz asume la necesidad de atribuir a los organismos vivos algún tipo de conocimiento previo a la experiencia que permita en su proceso de adaptación con el mundo la extracción de leyes y regularidades²⁶. La diferencia entre ambos autores estriba en que, según Lorenz, los juicios *a priori* kantianos son *a posteriori* desde un punto de vista evolutivo, ya que estos operan como mecanismos de supervivencia introducidos en la razón por evolución del aparato racionomorfo. El hecho de que el hombre construya 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

²⁵ Lorenz bautizó a estas funciones con el nombre de mecanismos de aprendizaje intuitivo [*Angeborene Lehrmeister*]. Cf. Lorenz (2009).

²⁶ 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: «Dichos conocimientos universales, que, a la vez, poseen el carácter de necesidad interna tienen que ser por 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).

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 previa²⁷ (Lorenz 2009, págs. 231-232).

Las ideas de Lorenz fomentaron una nueva carrera investigadora de raigambre multidisciplinar destinada al examen evolutivo de las estructuras y procesos que configuran el sistema cognitivo 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 antes de su nacimiento y la aleta del pez al agua²⁸» (*Op. cit.*, pág. 233). De ser así, el conocimiento podría 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 categorías²⁹.

3.4.2. El constructivismo en el siglo XX: Jakob J. Von Uexküll y el mundo circundante

A comienzos del siglo XX, el zoólogo alemán Jakob J. Von Uexküll (1864-1944), considerado por muchos el padre de la etología moderna, realizó importantes investigaciones en lo que denominó el mundo circundante (o

²⁷ La traducción es mía.

²⁸ La traducción es mía.

²⁹ Aun siendo así, cuesta negarse a creer que esta proyección subjetiva no guarde una cierta relación con cómo el mundo es realmente, ya que, tal y como se plantea Simpson, «el mono que no tuviera una percepción realista de la rama de un árbol a la cual saltaba, pronto hubiera sido un mono muerto y, por tanto, no se hubiera convertido en uno de nuestros ancestros» (Simpson 1964, pág. 88).

*Umwelt*³⁰) 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* [*Psychologie und Biologie in ihrer Stellung zur Tierseele*] de 1909, 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 a Uexküll para abordar el problema del espacio y la percepción en organismos vivos. Según Uexküll, cada organismo vivo 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 cuestión³¹. 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 (o *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

³⁰ 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.

³¹ 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.

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 exponer la idea de que no existe una misma realidad percibida por igual por dos organismos diferentes, ya que cada uno 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 presentada 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).

Para su teoría de los ciclos funcionales de los organismos, Uexküll adopta de Kant la noción de esquema, para quien, y así lo hace constar 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 acerca del esquematismo presente en la configuración mental de las formas percibidas por los organismos en relación con el medio en que estos se desarrollan.

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 esquema³² (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 arquetipo³³ (*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 analiza las diferencias entre cada uno de los mundos percibidos por diferentes tipos de organismos, llegando a la conclusión de 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).

Las aportaciones de Uexküll en cuanto al mundo circundante y ciclo funcional, así como su relación con el desarrollo ontogenético y filogenético de los

³² La traducción es mía.

³³ La traducción es mía

organismos, 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 1994a, 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).

El concepto de autopoiesis busca dar cuenta de que todo organismo vivo construye sus propios contenidos de información, los cuales, a su vez, delimitan la interacción del propio 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 vida³⁴.

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

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 1994a, pág. 58).

En 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

³⁴ En este sentido, los seres humanos, como máquina autopoiéticas, pueden sufrir perturbaciones originadas por el entorno, pudiendo provocar estos cambios de estado en sus estructuras cognitivas.

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, a su vez, pueden 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 que determinan la estructura interna del organismo en tanto a cómo este reacciona ante tales perturbaciones. En consecuencia, 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. 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. El constructivismo en el siglo XX: Jean 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 a la historia del hombre moderno.

Los estudios de Piaget buscaban desembarazarse del irresoluble problema innatismo-medio. Con excepción de contenidos y formas hereditarias muy primitivas, Piaget (1998) 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 otro lado, responde a una especie de actividad biológica con función adaptativa. En el caso de nuestra especie, *Homo sapiens*, esta posee una serie de estructuras biológicas que, tal y como rubricaría el mismo Uexküll, son innatas y que 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 infante 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 también 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 de estructuras cognitivas, 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., indisociables 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 centra [...] 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. Su experiencia del mundo se manifiesta 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 cognitivas³⁵.

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, indisociables 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 esta 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.

³⁵ 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.

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 los aspectos y 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. En esta etapa, 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 el sujeto es capaz de desarrollar razonamientos abstractos.

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 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» (Piaget 1978, pág. 17), un tipo de funcionamiento que remite a nuestra herencia evolutiva, la cual se ha ido formando a partir de la acción con el entorno y de la recepción de estímulos medioambientales.

3.4.4. El constructivismo en el siglo XX: El paradigma cibernético y el constructivismo radical

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

GREGORY BATESON

Con la llegada del siglo XX tuvo lugar una nueva teoría de la cognición de raigambre multidisciplinar 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* de 1979, 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 orden³⁶ (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 sociales³⁷. Estos mecanismos de causalidad circular se presentan como indicadores de que en el ámbito de la cibernética «se piensa circularmente, no linealmente³⁸» (Foerster 1997, pág. 19), razón por la que comenzaron a introducirse en el estudio de sistemas auto-organizadores³⁹. Heylighen & Joslyn (2001, pág. 21) ilustran las bases de esta idea

³⁶ La traducción es mía.

³⁷ El principio de circularidad de Foerster implica al mismo tiempo un principio de recursividad, o lo que es lo mismo, un conjunto de operaciones que se repiten sobre sí mismas.

³⁸ La tesis de la circularidad fue adoptada y, posteriormente, implementada por Maturana, quien la vinculó con su concepto de autopoiesis: «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).

³⁹ En *Visión y perspicacia* [*Sicht und Einsicht*], Foerster desarrolla en profundidad este principio de circularidad a través del símbolo del Uroboros. El sujeto que observa y el objeto observado se

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, originando en un comportamiento desenfrenado 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

interpenetran, dando lugar a una dimensión experiencial en la que ambos son inseparables. Cf. Foerster (1985).

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 individuales⁴⁰» (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).

Con ánimo de refrendar su visión radical del constructivismo 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

⁴⁰ 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.

diferenciada, según el cual en los estados de la actividad de una célula nerviosa no se codifica la naturaleza física del estímulo, sino su intensidad⁴¹. 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). Siendo así, el cerebro se ve obligado a construir y generar significados por comparación y combinación de eventos sensoriales elementales que tienen que ser, a su vez, 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 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).

El principio de codificación no diferenciada de Foerster fue incorporado posteriormente por Maturana y Varela a su teoría autopoiética, 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

⁴¹ El biólogo alemán Gerhard Roth suscribe la tesis de Foerster de un modo sugerente: «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).

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 1994a, 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 o del mismo. 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 de 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 resultarán en alteraciones permitidas por su organización estructural y no por una instrucción contenida en el agente perturbante⁴².

Así como Foerster, otro de los máximos representantes del constructivismo radical en el siglo XX fue el filósofo y cibernético de origen alemán Ernst Von Glasersfeld⁴³ (1917-2010), quien en relación a la definición propuesta por Foerster, añade que

⁴² 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.

⁴³ 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 subscribir la hipótesis de Sapir-Whorf acerca de que la estructura del mundo se troquele

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 (Glaserfeld 1981, pág. 36).

Para Glaserfeld (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. Para ilustrar esta idea, Glaserfeld 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 adaptación⁴⁴ (Glaserfeld 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 el hecho de que este asuma como imperativo biológico servir como instrumento adaptativo en el mundo de la experiencia. En este sentido, la adaptación biológica consistiría en salvaguardar una imagen plausible del mundo que permita al organismo

estrechamente con la lengua materna, interviniendo esta última de forma decisiva en cómo interpretamos y representamos la realidad que nos rodea.

⁴⁴ La traducción es mía.

adaptarse de forma exitosa, aunque esta no responda de forma objetiva a cómo el mundo es realmente⁴⁵.

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).

Asimismo, Glaserfeld recupera las ideas de Foerster y da un paso más allá en su visión particular del constructivismo radical al afirmar 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,

⁴⁵ En su introducción a *La realidad inventada*, Watzlawick ilustra la base del constructivismo radical de Glaserfeld a través de la siguiente metáfora: «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).

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 (Glaserfeld 1981, pág. 31).

Ante la radicalidad de las tesis de Glaserfeld, Paul Watzlawick (1921-2007), teórico y psicólogo austríaco, incorpora al constructivismo 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 sujeto evaluador [A] leía en voz alta al sujeto evaluado [B] una larga serie formada por pares de números, por ejemplo, 31 y 60. Después de que A leyera cada pareja, B debía responder si dichas parejas de números guardaban o no algún tipo de relación. Cuando B preguntaba qué tipo de relación debía de encontrar, A respondía que la finalidad del experimento consistía precisamente en descubrir dichas reglas de correspondencia. De este modo, se creaba en B la impresión de que se trata de un test de ensayo-error. Así, B comienza a responder aleatoriamente según criterios que va configurando en su esquema mental. En un primer momento, A califica las respuestas como incorrectas, pero con el tiempo deja ver a B que va aumentando en el número de respuestas acertadas. De este modo, B comienza a confiar en los criterios que él mismo ha construido para vislumbrar cierto grado de relación entre las parejas de números. Lo que B no sabe es que no existe relación alguna entre sus

respuestas y la reacción de A, ya que estas han sido seleccionadas de forma aleatoria. A emplea la curvatura de Gauss para hacer creer a B que las respuestas son incorrectas al comienzo y luego correctas con mayor frecuencia. Esto genera en B una falsa sensación de realidad que subyace a los pares de números a la que se aferra aun cuando A le confiesa que no existe ninguna relación. La convicción de B se fundamenta en que la relación construida es real. B ha construido una realidad, pese a creer haberla descubierto.

Las contribuciones de Foerster, Glasersfeld y Watzlawick sobre el modo de operar de la cognición consolidaron lo que a día de hoy se conoce como constructivismo radical, una nueva aproximación al estudio de los sistemas observacionales que allanó el sendero a 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 del mundo experiencial, un mundo que no obedece a una cartografía referencial de la realidad física, sino que se presenta como resultado de un conjunto de operaciones limitadas a la dinámica interna del propio sistema y orientadas a proveer una imagen plausible del mundo en términos de viabilidad.

4. CONCLUSIÓN

El siglo XX trajo consigo un cambio de paradigma orientado a acometer el estudio de la cognición atendiendo a las bases neurofisiológicas del propio sistema. Los estudios realizados por los primeros etólogos evolutivos, feudatarios de los postulados kantianos —las aportaciones de Lorenz sobre la evolución filogenética del conocimiento, los trabajos de Uexküll relativos al mundo circundante y ciclo funcional de los organismos, el concepto de autopoiesis introducido por Maturana y Varela, los estudios 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 una nueva

forma de entender la relación que se establece entre el observador y lo observado. Este nuevo modo de acometer el estudio de la cognición recibió el nombre de constructivismo, una escuela revolucionaria asentada sobre las siguientes premisas:

- El conocimiento no se adquiere de forma pasiva, sino que se construye de forma activa como un modo de situarse frente a la experiencia.
- La cognición es adaptativa, en el sentido biológico del término, tendiente hacia el ajuste y la viabilidad.
- La cognición sirve a la organización del mundo experiencial del observador y no al descubrimiento de una realidad ontológicamente objetiva.
- Todo sistema cognitivo es autorreferencial y organizacionalmente cerrado, por lo que este solo puede recurrir a sus propios recursos internos para asignar significado.
- La objetividad es pensar que una observación puede realizarse sin observador.

Ahora bien, a pesar del basamento empírico sobre el que se construyen estas premisas, el constructivismo plantea interesantes cuestiones. En primer lugar, si la realidad responde a una construcción limitada por la arquitectura cognitiva del observador, ¿no debería haber tantas realidades como observadores? ¿Y qué ocurre con la ciencia? ¿Acaso esta no da cuenta de una realidad objetiva más allá de nuestras propias impresiones subjetivas? ¿Y los modelos utilizados en la investigación? ¿Es que no funcionan estos como descripciones objetivas de cómo es el mundo? Veamos que tiene que decir el constructivismo 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 las formas, 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 paso del 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 físico, 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 naturaleza del mundo físico, más se ha ido encontrando con que este no es para nada como habíamos imaginado.

2. 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 a la que poder atribuir validez objetiva y 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. Glasersfeld 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 funcionan como fieles descripciones de cómo es el mundo o si, por el contrario, estos operan como meros instrumento para el cálculo y la predicción, se remonta hasta la más remota antigüedad, en 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 salvar⁴⁶ 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?⁴⁷» (Platón, cit. Duhem 1985, pág. 5). Esta aproximación al estudio del movimiento de los astros y 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 apariencias⁴⁸ (*Op. cit.*, págs. 5-6).

A diferencia de Platón, 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

⁴⁶ 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.

⁴⁷ La traducción es mía.

⁴⁸ La traducción es mía.

naturaleza de los cuerpos celestes. El suyo es el método del físico⁴⁹ (*Op. cit.* pág. 7).

La controversia entre la visión platónica frente a la aristotélica sembró la semilla de la discordia acerca de si los modelos utilizados para estudiar el mundo reflejan fielmente la realidad o si, por el contrario, solo permiten salvar su apariencia. Durante los siglos posteriores, las contribuciones en el terreno de la astronomía originaron dos posiciones contrapuestas: por un lado, aquella 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, más volcada a atribuir carácter metafísico a los modelos. En la vertiente platónica destacaron las aportaciones de Simplicio en el siglo VI, según las cuales «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 hipótesis⁵⁰» (Simplicio, cit. Duhem 1985, pág. 27). Por su parte, 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

⁴⁹ La traducción es mía.

⁵⁰ La traducción es mía.

celestes; sin embargo, alguna otra teoría bien pudiera también explicarlas⁵¹ (Santo Tomás 1920, pág. 160).

Incluso, algunos autores llegaron a adoptar ambas posiciones. 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 estrellas⁵²» (*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; Salas 2017a, 2017b) o si, por el contrario, existe algún tipo de correspondencia real entre la estructura teórica 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. Los enunciados científicos se encuentran vinculados cualitativamente de algún modo con el mundo, ya que entre ambos existe una correspondencia real. 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

⁵¹ La traducción es mía.

⁵² La traducción es mía.

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 múltiples versiones y paradojas irreconciliables, ha sido y sigue siendo en la actualidad la postura predominante en la filosofía de la ciencia moderna. 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 algunos de los más destacados se encuentran Thagard (1988), director del *Cognitive Science Program* de la Universidad de Waterloo, para quien el realismo científico es «la doctrina de la investigación científica que conduce a la verdad» (Thagard 1988, pág. 145); Sklar, para quien «las teorías [científicas] presentes están en vías de alcanzar la verdad y en el futuro serán vistas como orientadas hacia la dirección correcta» (Sklar 2002, págs. 87-88); Putnam, para quien el realismo científico es «la única postura filosófica que no hace del éxito de la ciencia un milagro» (Putnam 1975, pág. 73); o el mismo Popper, quien sostiene que «el objetivo de la ciencia es aproximarse poco a poco a la verdad⁵³» (Popper 1994, pág. 174). Asimismo, muchos han sido los autores que han intentado acotar semántica y conceptualmente lo que se entiende en la actualidad por realismo científico, extrayendo denominadores comunes presentes en todas y cada una de sus diferentes versiones. Tal es el caso de Brown (1994), para quien el realismo científico «tiene tres ingredientes⁵⁴» (Brown 1994, pág. 81) esenciales:

⁵³ La traducción es mía.

⁵⁴ La traducción es mía.

- i. 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.
- ii. Es posible llevar a cabo elecciones racionales —aunque falibles— entre teorías rivales.
- iii. La ciencia persigue la verdad.

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

- i. Una tesis metafísica, según la cual el mundo tiene una estructura de tipo natural definida e independiente de la mente.
- ii. 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.
- iii. Una tesis epistémica, según la cual los términos de los que hacen uso los modelos y teorías asumen referencia empírica; por lo que, si un modelo o 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:

- i. Una tesis teórica, según la cual las teorías científicas son genuinamente verdaderas o falsas.
- ii. Una tesis acumulativa, en la que 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.
- iii. Una tesis progresiva, en la que la ciencia progresa por aproximación a la verdad.

- iv. Una tesis optimista que sugiere que las teorías científicas son aproximadamente verdaderas.

Ya por último, Diéguez⁵⁵ desglosa el realismo científico en cinco tesis, las cuales «no tienen por qué ser aceptadas conjuntamente» (Diéguez 1998, pág. 78):

- i. Una tesis ontológica, según la cual las entidades postuladas por las teorías cobran existencia real; es decir, las entidades teóricas postuladas asumen referencia empírica.
- ii. Una tesis epistemológica, para la que las teorías científicas proporcionan un conocimiento adecuado tal y como el mundo es realmente, con independencia del papel que asuma el observador.
- iii. Una tesis teórica, en la que las teorías científicas son susceptibles de ser verdaderas o falsas.
- iv. Una tesis semántica, según la cual las teorías científicas son verdaderas o falsas en función de su correspondencia con la realidad.
- v. 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 aproximación, parece una empresa un tanto quijotesca encontrar una idea clara de qué es el realismo científico⁵⁶, pues, dentro de la amplia actividad investigadora que profesa esta corriente filosófica, algunos autores han decidido emanciparse de la visión ortodoxa e introducir nuevas aproximaciones con las que, abandonando la noción de verdad, ya sea como atributo de los

⁵⁵ 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).

⁵⁶ Para otras clasificaciones de realismo científico, véase Niiniluoto (1987), Moulines (1991) y González (1993).

enunciados científicos o como aspiración u objetivo de la propia ciencia, buscan un nuevo modo de abordar la relación entre el mundo físico y su modelización. Entre las muchas de estas aportaciones destaca la tesis estructural de Worrall (1989), heredera de la tradición estructuralista de la obra de Poincaré, que se postula como una alternativa al realismo científico prototípico. Según Worrall, «las ecuaciones expresan relaciones y si las ecuaciones son verdaderas es porque las relaciones siguen siendo reales» (Worrall 1989, pág. 118). Con su propuesta, Worrall busca garantizar la inferencia realista de la verdad como mejor explicación del éxito de la ciencia; sin embargo, al no demarcar semánticamente su concepto de relación, su tesis acaba subsumiéndose a una noción de verdad anclada en el esquema general del realismo ortodoxo.

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 otros⁵⁷» (Giere 1992, pág. 97). Esta tesis aporta «una aproximación cognitiva al realismo explícito de la reciente sociología de la ciencia» (Giere 1986, pág. 321), algo que le otorga un cierto carácter constructivista, ya que apunta a la idea de pensar los modelos como construcciones científicas, es decir, artificios construidos socialmente.

Como puede verse, la gran variedad de formas 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, dentro de lo que podríamos denominar un realismo científico prototípico, podría decirse que el realismo científico es la corriente filosófica cuyos postulados se encuentran ligados, en mayor o menor medida, a la tesis aristotélica de verdad como correspondencia. A diferencia del realismo, el constructivismo rechaza toda pretensión a la verdad y apela a la viabilidad predictiva de un modelo, es decir, a su ajuste funcional, como único criterio válido para su aceptación, ya que entiende la correspondencia que se establece entre la estructura teórica de un modelo y la estructura física del mundo como

⁵⁷ La traducción es mía.

una relación de equivalencias funcionales y no como una fiel representación en términos de semejanza, verosimilitud o isomorfismo con cómo el mundo es realmente. Al igual que el alcance de todo sistema de observación se constriñe a las estructuras y procesos que integran su arquitectura cognitiva, para el constructivismo el alcance predictivo de un modelo viene determinado por su estructura teórica, la cual es, a su vez, resultado de un dilatado y singular proceso de construcción que comienza en la fase de observación.

3. CIENCIA, COGNICIÓN Y CONSTRUCTIVISMO: EL PAPEL DEL OBSERVADOR EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

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

CARLOS CASTAÑEDA

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

ARTHUR S. EDDINGTON

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 las regularidades percibidas en el comportamiento de cualquier fenómeno natural, así como en su ulterior recogida de datos y formalización teórica. El observador es el que pone en relación los propios procesos científicos y cognitivos. El hecho de que ambas estrategias –ciencia y cognición– asuman como principal cometido la acumulación de un cuerpo solvente de datos con el que elaborar un esquema coherente y relativamente estable del mundo conduce a una reconsideración acerca de qué 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* distinguía 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).

Según el fragmento de Demócrito, la ciencia se presentaría 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; si bien es cierto, potenciados estos últimos con la ayuda de modelos que no cumplen otra función más que la de prótesis genuinas que hacen las veces de prolongaciones exosomáticas de nuestras ventanas sensoriales. Adoptando una postura un tanto provocativa, podría decirse que la ciencia se inscribe en esta aproximación oscura al estudio del mundo dado el fundamento empírico en el que se apoya desde la era medieval. Ahora bien, reconocer la importancia de la observación en todo el proceso de investigación no implica relegar la razón a ocupar un papel de mera anfitriona. Ilustremos esto con un ejemplo rescatado de la propia 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 hacia el cielo, concretamente al planeta Júpiter, pudiendo observar este como un disco redondo planetario. Este dispositivo le permitió apreciar cuatro puntos brillantes próximos a este planeta, a los que, en honor a su mecenas, denominó estrellas mediceas. Al contemplarlos con cierta asiduidad, Galileo observó que estos cuatro puntos brillantes –los que hoy conocemos como sus satélites mayores: Io, Europa, Ganímedes y Calixto– 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 bien, haciendo uso de los mejores medios ópticos, se llegaban a apreciar sus sombras proyectadas sobre el disco de Júpiter. Este hecho marcó un momento estelar en la historia de la humanidad, 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 utilizados en ciencia desempeñan un papel similar. Estos funcionan como una extensión de nuestro sistema de observación y 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 predicciones a un lenguaje inteligible. Siendo así, el constructivismo permite introducir un nuevo modo de abordar el estudio de la modelización a partir de un examen de la dinámica interna representativa de los sistemas observacionales. Para ello, el constructivismo (científico) parte de un conjunto de premisas teóricas a partir de las cuales articula dicho examen:

- En primer lugar, se niega toda posible escisión entre un presunto mundo objetivo y la propia experiencia subjetiva.
- Se rechaza el representacionalismo tradicional. El conocimiento se presenta como el resultado de la actividad cognitiva del sistema y no como un mapeado especular del mundo físico.
- Cualquier referencia a una realidad independiente situada más allá del horizonte cognitivo del propio sistema obedece a una especulación metafísica.
- Todo sistema cognitivo es autorreferencial y organizacionalmente cerrado; es decir, este se define por los procesos mediante los cuales se constituye y mantiene su propia organización.
- El mundo interpretado obedece al resultado de los procesos de reconstrucción neuronal y tiene como principal cometido generar un comportamiento funcional con el medio que garantice en última instancia la supervivencia del propio sistema.

Al focalizar su atención en la relación que se establece entre el mundo físico y su formalización, el constructivismo permite estudiar la fase de modelización dentro de un contexto epistemológico acorde a la neurociencia moderna a partir de cuatro niveles operatorios presentes en cualquier escenario de investigación:

- i. El nivel de lo no observable [NNO]; es decir, aquel no accesible a partir de la experiencia sensorial más inmediata y que a su vez 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 neuronal [NRN], conformado este por las estructuras y procesos cognitivos que integran cualquier sistema de observación particular.
- iv. El nivel de las teorías [NT]. En este nivel tiene lugar la formalización abstracta del comportamiento de un fenómeno intuido en el NNO en forma de teoría – *explanans* –.

Esta clasificación permite abordar la relación entre la formulación matemática de un modelo y las causas que conducen a su formalización: su génesis. La relación entre el NNO y el NT es posible gracias a una intermediación por parte del NRN, dando como resultado una posible pluralidad de modelos a la hora de estudiar el comportamiento de un fenómeno, un hecho recurrente en la historia de la ciencia.

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, estas regularidades se manifiestan como patrones sistemáticos en un esquema espacial y temporal. El sistema cognitivo descubre que determinados fenómenos se comportan de acuerdo con un patrón repetitivo, cuyas regularidades tienen su origen en la estructura física del mundo, pero cuya percepción depende

estrechamente de la dinámica interna del sistema de observación particular. 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). Estos patrones espacio-temporales son sistemas relativos y constituyen el marco conceptual para la construcción de estas relaciones funcionales. 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 comportamiento observados –NO–, de modo que para poder predecir y dar cuenta de estos fenómenos es necesario estudiar los mecanismos ocultos que los originan. Para ello, el sistema observacional aísla estados, transiciones y correlaciones que considera relevantes para salvar las regularidades observadas. A lo largo de este proceso de construcción, tienen lugar distintas fases de decodificación de la información ligadas a la clasificación anterior. En la primera fase de construcción, el sistema, tanto a nivel sensorial como neuronal, construye, de acuerdo con su arquitectura cognitiva, algún tipo de relación entre los patrones y regularidades observadas. En una segunda fase, el sistema establece correlaciones mediante sus mecanismos de retroalimentación en forma de patrones y regularidades espacio-temporales. Estos patrones y regularidades no están presentes en el mundo, ya que se construyen mediante un proceso activo de búsqueda limitado por los patrones y regularidades del propio sistema. En la tercera fase se procede a una descripción universal abstracta de estos patrones y regularidades; es decir, a su formulación matemática.

La abstracción, por su parte, se presenta como el rasgo esencial del conocimiento científico. La sobrecogedora complejidad de la realidad física empuja a la ciencia a la selección deliberada de aspectos de esta para hacerla así accesible a la razón y a la manipulación intelectual. Esta selección de rasgos esenciales para la investigación se formaliza matemáticamente en un modelo. Como resultado, pueden darse dos o más modelos predictivamente exitosos en su cometido,

aunque cada uno reduzca la parcela de realidad observada a su propia estructura teórica. Así lo expresa Glasersfeld:

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 (Glasersfeld 1994, pág. 23).

En ciencia, el cometido de los modelos no consiste en ofrecer una descripción objetiva de la naturaleza del mundo físico, sino en formalizar matemáticamente el estado interno, transiciones de estados y regularidades que tienen lugar en el NNO con ánimo de intervenir predictivamente en este de forma exitosa. Para el constructivismo, la estructura matemática de un modelo no obedece a una cartografía referencial del mundo físico, sino a una amplia gama de estrategias funcionalmente exitosas con las que establecer correlaciones funcionalmente exitosas entre las regularidades y patrones de comportamiento observados y la estructura matemática del modelo en cuestión. En el dominio de la cognición, estas correlaciones tienen su origen en el NRN y se extienden al NT como una abstracción con el objetivo de generar un comportamiento funcionalmente exitoso (Glasersfeld 1995a; Maturana 1991; Roth 1992, 1994).

4. MODELOS (MATEMÁTICOS) EN CIENCIA

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 WITTEGENSTEIN, *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 que asumen las partículas que componen el gas. Al igual que 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 los fenómenos sociales más complejos. Poco después, en 1956, Robert Solow sostuvo que el crecimiento económico dependía estrechamente del nivel tecnológico de un país, y para demostrarlo, abordó la idea de 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. Pues bien, ¿qué tienen en común todos estos casos? Pues que en todos ellos se ha hecho uso de una versión simplificada de la realidad para, en primer lugar, inferir consecuencias prácticas y, en segundo, asumir que entre esta simplificación y la realidad misma existe una vinculación real. Esta versión simplificada de la realidad es lo que se conoce en ciencia como un modelo.

En la actualidad, no resulta fácil delimitar semánticamente la noción de modelo, por lo que, de ahora en adelante, cada vez que haga uso del término me referiré

a un artificio matemático cuyo cometido persigue el éxito predictivo en el cálculo y estimación del comportamiento de un fenómeno o conjunto de fenómenos sometidos a estudio. Como artificios matemáticos, los modelos facilitan el análisis cuantitativo de las observaciones, de ahí que asuman valor operatorio, pues se construyen en última instancia con un fin predictivo. Veamos algunos ejemplos de modelos rescatados de la historia de la ciencia:

Física

A comienzos del siglo XVI, Nicolás Copérnico ideó un modelo heliocéntrico del Sistema Solar que hizo tambalear la cosmovisión geocéntrica heredada que imperaba desde el siglo IV a.C.⁵⁸. Copérnico defendió que la razón por la cual 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 era 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 Weinberg, Hardy, Fisher y Morgan 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 económicos permiten expresar las relaciones entre las variables consideradas significativas dentro del funcionamiento de un sistema

⁵⁸ En realidad, la primera concepción heliocéntrica del Sistema Solar fue propuesta por Aristarco de Samos (ca. 310-230 a.C.) en el siglo III a.C., quien situó el Sol, y no la Tierra, en el centro del universo conocido, convirtiéndole en un claro precursor de Copérnico.

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 estructura matemática se formaliza en un sistema de ecuaciones lineales, permite el estudio de la realidad económica a partir del álgebra lineal⁵⁹.

Lingüística

Muchos modelos lingüísticos han permitido 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 transformacional que, a partir de un conjunto de reglas transformacionales, permite reproducir el desplazamiento de constituyentes del lenguaje natural. (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, facilita el recuento exacto del número de electrones de valencia de un elemento que interactúan con otros o entre su misma especie, formando enlaces simples, dobles o triples.

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

⁵⁹ 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: $X_i = Z_{i1} + Z_{i2} + Z_{i2} + \dots + Z_{in} + Y_i$

Dada la inexorable implicación que los modelos asumen en la investigación científica, estos modelos no escapan a una posible clasificación según sea el tipo. Aunque no es el propósito de este trabajo ofrecer una tipología de los diferentes modelos utilizados en las diferentes disciplinas y ámbitos de especialidad, sí considero importante recuperar la clasificación expuesta por Cristina Bicchieri (Echeverría 1989, pág. 45) en su introducción a la versión italiana de la obra de Mary B. Hesse *Models and Analogies in Science*, ya que resulta muy ilustrativa para precisar algunas características esenciales que los modelos asumen en ciencia, especialmente en Física.

Según Bicchieri, los modelos se clasifican de acuerdo a cinco tipos. En primer lugar, los modelos lógicos, los cuales constituyen una serie de interpretaciones semánticas de un sistema axiomático. En segundo lugar, los modelos matemáticos, en los que se presupone una vinculación real entre el mundo físico y un conjunto de formulaciones matemáticas. En tercer lugar, los modelos analógicos, isomorfos con respecto a la parcela de realidad que describen. En cuarto lugar, los modelos teóricos, en los que parte de una serie de suposiciones acerca de la estructura real del mundo. Y ya por último, en quinto lugar, los modelos imaginarios, que idealizan en exceso la realidad, facilitando así su estudio. Esta clasificación propuesta por Bicchieri es, como poco, artificiosa. En primer lugar, cualquier modelo que busque dar cuenta de una posible teoría debe ser susceptible de formalizarse matemáticamente. En este sentido, un modelo matemático es por definición un modelo teórico. Del mismo modo, un modelo puede dar cuenta predictiva de un fenómeno observado –NO–, pero también puede tener como cometido predecir el posible comportamiento de un fenómeno no observable –NNO–. En ambos casos, el modelo responde a una idealización, por lo que un modelo matemático es también un modelo imaginario.

La idea de que la investigación en ciencias naturales esté dirigida a fenómenos que todo el mundo puede ver, da origen a la idea de que esa investigación proporciona conocimiento sobre la realidad cotidiana «en toda su complejidad». Nada es menos cierto. En todas las ciencias

naturales se trata evidentemente de idealizaciones radicales de la realidad. Y es de destacar que es gracias a esas idealizaciones por lo que las ciencias han tenido tanto éxito [...] La realidad de las ciencias naturales es siempre una «realidad de laboratorio». Y no es la realidad investigada, sino la investigación, lo que señala hasta dónde debe llegar una idealización⁶⁰ (Kerstens & Sturn 1989, pág. 67).

Las hipótesis de partida sobre las que se configura un modelo responden en ocasiones al resultado de establecer correspondencias parciales de identidad – analogías – entre dos dominios de experiencia. Entre las muchas estrategias cognitivas que permiten establecer esta correspondencia se encuentra el desplazamiento analógico⁶¹.

Es por tanto la facultad mental de representarse lo que no es real, lo que no está presente, la que posibilita el uso de símbolos. Esta facultad asimismo permite al individuo imaginar escenarios, situaciones u objetos nunca antes percibidos, [...] (re)crear mentalmente el universo. En esto consiste la facultad del desplazamiento, una propiedad de la mente crucial para entender el poder simbólico del lenguaje y su conexión con la ficción (Salguero-Lamillar 2013, pág. 116).

Esta estrategia de desplazamiento permite poner en interacción diferentes dominios para construir un nuevo, resultado de una correspondencia de identidad entre los dos anteriores. En este sentido, un modelo matemático es también un modelo analógico.

⁶⁰ La traducción es mía.

⁶¹ Este desplazamiento analógico, analizado en detalle en el tercer capítulo, puede producirse en horizontal, por ejemplo, al vincular analógicamente la naturaleza de la masa y la energía en física relativista, permitiendo así relacionar los fenómenos observados en un marco de referencia estático y un marco de referencia acelerado; en vertical, al elevar las leyes que rigen el dominio del conjunto de fenómenos mecánicos al dominio del conjunto de todos los fenómenos físico; e incluso llegando a incluir dominios pertenecientes a otros ámbitos disciplinares, como ocurre con las analogías que permiten conectar los marcos de referencia en rotación con las geometrías bidimensionales no euclídeas.

El problema, y me ciño a la clasificación expuesta por Bicchieri, aparece al plantear un modelo matemático como un modelo lógico, ya que el lenguaje con el que se formalizan los modelos, es decir, el lenguaje matemático, resulta en ocasiones irreductible a un lenguaje lógico⁶². Veamos esto a partir de un ejemplo.

Consideremos la ley de conducción del calor:

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

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. En coordenadas cartesianas tridimensionales, este operador se describe de la siguiente forma:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k},$$

siendo \vec{i} , \vec{j} y \vec{k} los vectores unitarios en las direcciones de los ejes coordenados. Esta fórmula da cuenta, a partir de una ecuación diferencial, de la dependencia de la temperatura con respecto de las condiciones geométricas de un sólido y del paso del tiempo (Chapman 1984). Si traducimos la ecuación, es decir, su formulación matemática, a un lenguaje de lógica de predicados que permita cuantificar las propiedades del cuerpo, el resultado sería el siguiente:

$$\begin{aligned} & (\forall x \rho \forall x k \forall x c_p \forall x q^* \forall x t \forall x \tau) [\exists y F(x \rho, x c_p, x t, x \tau) = y \ \& \ \exists z G(x k, x t, x q^*) \\ & = z \ \& \ R(y, z)] \end{aligned}$$

⁶² Según Wagensberg, el lenguaje matemático constituye la mínima expresión de lo máximo compartido; es decir, la síntesis última –la mínima expresión– de un fenómeno que adquiere validez universal –lo máximo compartido–. En este sentido, una fórmula matemática es, por definición, irreductible a un lenguaje lógico, ya que, de ser así, no sería la mínima expresión. Cf. Wagensberg (2015).

De modo que:

$$F(\rho, c_p, t, \tau) \leftrightarrow G(k, t, q^*)$$

Como puede comprobarse, el operador nabla ($= \nabla$) presenta un problema, ya que al utilizar derivadas parciales de una variable con respecto a las magnitudes espaciales x, y, z , este escapa al alcance del lenguaje lógico, ya que obedece a un concepto puramente físico. Es más, si no nos contentáramos con la mera traducción y analizáramos la expresión lógica resultante, observaríamos que esta no da cuenta de lo fundamental de la ecuación: *cómo* varía la temperatura en función del resto de magnitudes. A mención de este *cómo*, gusto citar un fragmento de la obra de Ian Stewart *¿Juega Dios a los dados?*:

Galileo se dio cuenta de que las preguntas sobre el propósito de las cosas no proporcionaban a la humanidad control sobre los fenómenos naturales. En lugar de preguntar por qué cae la piedra, él buscaba una descripción precisa de cómo cae. En lugar del movimiento de la Luna, en el que él no podía influir o regular, estudió bolas redondas sobre planos inclinados. Y, en un golpe genial, confinó su atención a unas pocas cantidades claves: tiempo, distancia, velocidad, aceleración, momento, masa, inercia. En una época más propicia a cualidades y esencias, su elección mostro un notable dominio de lo fundamental, especialmente debido a que muchas de las variables por él elegidas no se presentaban de forma inmediata a ninguna medida cuantitativa (Stewart 1996, pág. 36).

4.1. Los límites de la modelización en ciencia

4.1.1. Los límites de la modelización en ciencia: El mundo físico no funciona como un sistema axiomático

Las regularidades y patrones de comportamiento observados en el mundo físico no responden al funcionamiento de un sistema axiomático, ya que, de ser así, no 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. Sirvámonos de la ecuación anterior como ejemplo, la cual describe el equilibrio calorífico de un cuerpo:

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

Ahora, consideremos la ley de Laplace⁶³:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0,$$

la cual expresa la dependencia de la temperatura t en el sólido respecto de las coordenadas espaciales.

Siendo el operador nabra ($= \nabla$) en la primera ecuación:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

T una teoría axiomática en la que, por definición, de los axiomas se deducen los teoremas, ¿cuál sería la derivación lógica de la ecuación a partir de la teoría de la termodinámica? ¿Es posible la deducción de los teoremas de la termodinámica a partir de una serie de axiomas? Lo cierto es que no, ya que, para empezar, 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 sea constante, no exista variación de la temperatura con respecto del tiempo (ecuación de Poisson: $\Delta \varphi = f$) y no haya generación de calor interno, la segunda ecuación, la ley de Laplace, sería predictivamente válida 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

⁶³ Esta ecuación expresa la dependencia de la temperatura t en el cuerpo con respecto de las coordenadas espaciales.

ciencia son flexibles. Las conjeturas matemáticas pueden verificarse axiomáticamente convirtiéndose en teoremas; sin embargo, 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 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 propia realidad física la que niega o da validez al alcance predictivo de un modelo.

4.1.2. Los límites de la modelización en ciencia: El ajuste funcional de un modelo es gradual

Los trabajos realizados por el matemático Herald Helfgott durante los años 2012 y 2013 demostraron la conjetura –ya teorema– de Goldbach, 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 –conocida ahora como el teorema de Mihăilescu–, según la cual la única solución en el conjunto de los números naturales de $x^a - y^b = 1$ para $x, a, y, b > 1$ es $x = 3, a = 2, y = 2, b = 3$.

A diferencia de la resolución de una conjetura matemática, a la hora de acometer el estudio del mundo físico, no existe la seguridad de que un modelo vaya a resultar predictivamente exitoso. Su ajuste funcional es gradual, así como medible en su error. Algunos de los modelos más exitosos, como el Modelo Mecanicista de Newton [MMN], presentan serias limitaciones predictivas conforme se alejan de su dominio de aplicabilidad, tal y como veremos más adelante. La adecuación entre la estructura teórica de un modelo y el mundo físico estudiada no es binaria, es decir, de 0|1, sino gradual en virtud de su viabilidad predictiva, o lo que es lo mismo, su ajuste funcional.

4.1.3. Los límites de la modelización en ciencia: Los modelos no son fieles representaciones de la estructura del mundo

Los conceptos físicos son creaciones libres de la mente humana, y no están determinados de manera única por el mundo exterior. En nuestro esfuerzo por comprender la realidad, somos, en cierto modo, como un hombre que intenta comprender el mecanismo de un reloj. Él lo observa, incluso oye el tic-tac, pero no tiene forma de abrir el estuche. Si es ingenioso, puede formar una imagen del mecanismo que podría ser responsable de todas las cosas que observa, pero puede que nunca esté seguro de que su imagen sea la única que pudiera explicar sus observaciones. Nunca podrá comparar su imagen con el mecanismo real y, ni tan siquiera, imaginar la posibilidad o el significado de tal comparación.

ALBERT EINSTEIN

La idea de que los modelos funcionan como representaciones del mundo se explicita en Giere:

Un científico S usa X para representar algún aspecto del mundo W según unos fines concretos P [...] El enfoque en el lenguaje como un objeto [de estudio] en sí mismo conlleva la suposición de que nuestro enfoque debe basarse en la representación, entendida esta como una relación entre las entidades lingüísticas y el mundo. Cambiar el enfoque a la práctica científica sugiere que deberíamos comenzar con la actividad de su representación⁶⁴ (Giere 2004, pág. 743).

A diferencia de Giere, el constructivismo rechaza cualquier presunto valor representativo atribuido a los modelos, ya que considera que la relación que se da entre la estructura matemática de estos y la estructura real del mundo físico no se fundamenta en criterios de semejanza, verosimilitud o isomorfismo, sino

⁶⁴ La traducción es mía.

que se define en términos predictivos. Veamos esto a partir de un ejemplo (Calvo 2006, págs. 56-69).

Supongamos que queremos calcular la antigüedad de un cráneo humano que contiene una tercera parte de carbono (^{14}C). Si consideramos que el número de isotopos radiactivos ^{14}C se mantiene constante en un organismo vivo, es posible construir un modelo simplificado que permita datar la antigüedad del cráneo a partir de una hipótesis de partida (H1): *El número de átomos que se desintegran es proporcional a la cantidad de átomos totales*. Esta hipótesis se formaliza matemáticamente a partir de la siguiente ecuación:

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

Siendo $N(t)$ el número total de átomos presentes en el instante t y k la constante de decaimiento para el $^{14}\text{C} \cong 0,000126$, resulta posible predecir la antigüedad del cráneo. Si consideramos que N_0 es el número de átomos en el instante $t = 0$, es decir, en el momento de la muerte, la fórmula anterior permite aplicar una ecuación lineal de primer orden a partir de unos valores iniciales:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -kN = 0; \quad N(0) = N_0$$

Al integrar, obtenemos que:

$$N(t) = N_0 e^{-kt}$$

Cuando el cráneo tiene $N_0/3$ átomos de ^{14}C ,

$$N(t) = N_0 e^{-kt} = \frac{N_0}{3}$$

Así, el tiempo transcurrido se obtiene despejando t ,

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

Como puede comprobarse, el modelo anterior se muestra predictivamente exitoso a la hora de salvar la distancia –y nunca mejor dicho– entre la antigüedad del cráneo y una simple ecuación lineal de primer orden. Ahora bien, pese al éxito del modelo, este no asume valor representativo alguno, ya que su viabilidad predictiva, es decir, su ajuste funcional, se limita únicamente a la precisión en su estimación.

4.2. Éxitos y fracasos de los modelos en ciencia

La ciencia ha convertido la historia de la investigación en la historia de la modelización, prefiriendo el estudio de objetos simples –modelos– en detrimento de objetos complejos –entidades y fenómenos físicos–. Si por algo se caracteriza la ciencia es por su reduccionismo a la hora de acometer el estudio del mundo; es decir, por su capacidad para aislar de la parcela de realidad estudiada todos aquellos aspectos que puedan resultar irrelevantes en la investigación. Los modelos permiten esta abstracción, reduciendo un fenómeno físico a su síntesis cuantitativa a partir de la formalización matemática. Este proceso de modelización comienza con la integración de un conjunto de hipótesis restringidas a estudiar el comportamiento de un aspecto del mundo y culmina con su verificación experimental, es decir, con su éxito empírico.

4.2.1. 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. La investigación científica «se volvió asimismo esotérica al final de la edad Media para recuperar la comprensibilidad general tan solo brevemente al comienzo del siglo XVII, momento en que un nuevo paradigma sustituyó al que había guiado la

investigación medieval» (Kuhn 2004, pág. 54). En 1687, la publicación de *Philosophiæ naturalis principia mathematica* de la mano de Isaac Newton marcó un punto de inflexión en el modo de concebir el mundo.

No hay otra obra conocida en toda la historia de la ciencia que haya permitido simultáneamente un aumento tan considerable en la amplitud y la precisión de la investigación. En el caso de los cielos, Newton había derivado las leyes de Kepler del movimiento planetario, a la vez que había explicado algunos aspectos observados en los que la Luna dejaba de obedecerlas. Por lo que respecta a la Tierra, había derivado los resultados de algunas observaciones dispersas sobre péndulos y sobre mareas [...] Dado el estado de la ciencia en aquel momento, el éxito de estas demostraciones fue tremendamente impresionante (*Op. cit.*, 69).

La nueva concepción determinista del universo supuso no solo un nuevo modo de entender la física de los cuerpos, sino toda una filosofía en su conjunto, a partir de la cual el propio Kant tomó partido 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] que describía los fenómenos naturales en términos de materia y movimiento revistió de certeza una renovada visión del mundo. 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 presenta como algo absoluto, siempre en reposo e inmutable, donde los cambios ocurren en el transcurso del tiempo que, al mismo tiempo, es una dimensión sin conexión alguna con el mundo material y que fluye desde el pasado hacia el futuro.

Inspirados por los hallazgos científicos 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, describiendo el calor como energía originada a partir del movimiento acelerado de estos

corpúsculos materiales últimos. 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.

Pero con el tiempo, algunas de las observaciones realizadas años más tarde mostraron que la órbita de algunos orbes celestes no obedecía fielmente a 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, razón por la que los resultados obtenidos presentaban serias limitaciones teóricas a la hora de abordar el problema del «[movimiento] de más de dos cuerpos atrayéndose a la vez, así como para estudiar la estabilidad de las órbitas perturbadas» (Kuhn 2004, pág. 71). Pese a todo, el MMN se mantuvo inamovible hasta finales del siglo XIX, momento en que las contribuciones de Maxwell al estudio 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 paradigma: el paradigma relativista.

Este nuevo paradigma relativista se erigía sobre dos principios básicos: en primer lugar, las leyes físicas son invariantes conforme a las transformaciones de Lorentz, es decir, estas son 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). Este cambio en el modo de entender la física de los cuerpos llevó 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 matemática⁶⁵. Si bien en este caso resulta posible establecer una relación matemática de derivabilidad entre el MMN y el MRG, el problema surge al considerar la dimensión semántica de los términos y entidades teóricas involucradas en ambos modelos. Entre los partidarios de esta aproximación semántica se encuentra Kuhn, quien llega a la conclusión de que no es posible establecer dialogo coherente alguno entre modelos que atribuyen una significación distinta a las entidades sobre las 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

⁶⁵ Véase Anexo I.

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 los 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 que Sneed, 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 las entidades teóricas involucradas, ya que los términos de los que ambos modelos hacen uso podrían no adquirir – y, de hecho, no adquieren – la misma referencia empírica. La transición de la mecánica newtoniana a la relatividad ilustra con particular claridad este cambio semántico. 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), pues, aunque el término empleado sea el mismo, su significado no lo es.

4.2.2. El problema de la 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*

La verificación experimental de un modelo supone la última etapa de la investigación científica. Como ejemplo de ello, podemos traer a colación el, ya mencionado, MMN, para el que fueron necesarios un sinnúmero de observaciones a través de los siglos, desde los realizados por los precursores de Ptolomeo en Persia y Grecia hasta los más destacados representantes científicos a partir del siglo XV, como Nicolás Copérnico, Ticho Brahe o Johannes Kepler. Esta es la razón por la que los modelos científicos –especialmente el MMN– no deben pensarse como una mera recapitulación de datos empíricos, sino como el resultado de una formulación racional singularmente creativa.

Entre el gran número de modelos exitosos en ciencia, el MMN se torna paradigmático por varias razones. En primer lugar, su análisis y síntesis para la comprensión de las leyes de la naturaleza –incluida la gravedad– no solo supuso una aproximación revolucionaria en el estudio de la física de los cuerpos, sino que instauró una nueva concepción mecanicista del universo en su conjunto. Algunas personas llegaron incluso a pensar que el enigma del mundo físico casi se había resuelto. Tal fue el caso de Cotes, quien en su prefacio de la segunda edición de los *Principia* confiesa: «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» (Cotes, cit. Newton 2011 [2ªed., 1729], págs. 15-16).

En *El mito del marco común*, Popper se cuestiona acerca de esta presunta veracidad atribuida a los modelos científicos: «¿Puede un modelo ser cierto? No lo creo. Cualquier modelo, ya sea en física o en las ciencias sociales, debe ser una

simplificación excesiva⁶⁶» (Popper 1994, pág. 172). Pero 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 verdad⁶⁷» (*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 aproximación, y la de Einstein mejor aún⁶⁸» (*Op. cit.*, pág. 176). Con esta declaración, Popper aboga por una visión del progreso científico por aproximación a la verdad, algo que Laudan transcribiría posteriormente en términos técnicos como realismo convergente.

Además de Popper, la idea de que la ciencia progresa por aproximación a la verdad ha sido compartida por prominentes científicos y filósofos de la ciencia contemporáneos. Tal es el caso de Kitcher, para quien

en la historia de la ciencia ha habido dentro de un campo una secuencia de teorías T_1, \dots, T_n tal que, para cada i , T_{i+1} se ha aceptado como superior a T_i , entonces por cada j mayor que $i+1$, T_{i+1} parece más cercano a la verdad que T_i desde la perspectiva de T_j . Entonces, podemos esperar que nuestras teorías les parezcan a nuestros sucesores más cercanas a la verdad que las de nuestros predecesores (Kitcher 1993, pág. 137).

Al igual que Kitcher, entre los defensores de este realismo convergente podemos citar a Sklar, para quien la ciencia se encuentra «en el camino hacia la verdad y que el futuro dará cuenta de si se ha encaminado en la dirección correcta» (Sklar 2002, págs. 87-88); o a Boyd, quien admite que «si las teorías científicas no fueran (aproximadamente) verdaderas, sería un milagro que produjeran predicciones tan precisas» (Boyd 1984, pág. 43).

En contraposición a esta tesis, argumentaré que en ciencia la presencia de modelos que operan en dominios distintos se muestra incompatible con la idea de que estos sean verdaderos o aproximadamente verdaderos, pese a que cada

⁶⁶ La traducción es mía.

⁶⁷ La traducción es mía.

⁶⁸ La traducción es mía.

uno por separado pueda mostrarse predictivamente exitoso dentro de su dominio de aplicabilidad, tal y como hemos visto anteriormente. Para refrendar esta idea, el MMN se vuelve, una vez más, paradigmático debido al gran número de aplicaciones metodológicas que ofrece (Rivadulla 2004b, págs. 141-144). Entre las muchas aplicaciones del MMN, vale la pena destacar el notable éxito que este ofrece para calcular la masa del Sol:

$$M_{\odot} = \frac{4\pi^2 d^3}{G_N p^2},$$

así como la de la Tierra:

$$M_{\oplus} = \frac{gr^2}{G}$$

Siendo $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} kg$ y $M_{\oplus} = 5,9 \times 10^{30} kg$, respectivamente.

El MMN también se muestra notablemente exitoso en el cálculo de la densidad crítica ρ_c del Universo:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

Si consideramos un modelo esférico del Universo:

$$V = \frac{4\pi r^3}{3},$$

con una velocidad de recesión v_e ,

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}},$$

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 ρv . De este modo, obtenemos:

$$H^2 r^2 = \frac{2G\rho v}{r}$$

Ahora, si reemplazamos por V :

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

obtenemos al simplificar la densidad crítica ρ_c :

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N}$$

El MMN permite calcular también 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 ($7,97 \text{ kpc}$) y su trayectoria orbital alrededor del centro ($v \sim 251 \text{ km/s}$), siendo esta de un periodo de $p \sim 2,25 - 2,50 \times 10^8$ 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 H. Oort fue el primero en calcular el número de masas estelares en la Vía Láctea midiendo la distancia del Sol al bulbo galáctico. El número de masas estelares que Oort predijo fue $\sim 1 \times 10^7$. Más tarde, en su estudio de la rotación de las galaxias en 1932, Oort postuló la existencia de una presunta materia oscura al observar que las estrellas se movían a una velocidad mayor de lo que se pensaba. La posible existencia de esta materia imperceptible desestabilizó los fundamentos de la física teórica de aquel momento, ya que, según el MMN, la velocidad orbital v_{orb} de las estrellas más alejadas del bulbo galáctico debería reducirse con la distancia. De un modo similar, en 1957, Vera Rubin anunció que la mayoría de las estrellas en galaxias espirales orbitan casi a la misma velocidad, siendo la velocidad orbital de los cuerpos estelares más alejados del bulbo galáctico aproximadamente constante: $v_{orb} = \text{const}$ (Rubin et al. 1980, págs. 471-487). Esta afirmación se vio reforzada por ulteriores observaciones. 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 debería orbitar alrededor del centro de la galaxia de forma similar a como 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. Sin embargo, las observaciones del halo galáctico mostraron que esto no ocurría. Además, la velocidad de rotación ω no solo no se reducía, sino que permanecía constante.

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 estas ondas gravitacionales, ya que los postulados newtonianos no operan en dominios de intensa gravedad. Veamos esto con un ejemplo.

Un agujero negro de Schwarzschild se describe como una región del espacio-tiempo definida por un único parámetro, su masa M , y delimitada por un horizonte de sucesos, una frontera de la cual nada, incluso la luz, puede escapar. Su radio recibe el nombre de radio de Schwarzschild, cuya formulación matemática es: $r_s = 2GM/c^2$. Por tanto, cuanto mayor sea M , que determina el grado de la curvatura espacio-temporal, mayor será el radio de Schwarzschild⁶⁹.

Pues bien. Sabiendo esto, según el MRE, el corrimiento al rojo z vendría dado por:

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

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

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.

Por el contrario, si utilizamos el MMN para calcular el mismo fenómeno, comprobamos que el corrimiento al rojo vendría dado por:

⁶⁹ Véase Anexo II.

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

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

Una estimación bastante imprecisa, ya que, según el MMN, la luz seguiría siendo visible con una frecuencia correspondiente a la mitad de la emitida por la estrella⁷⁰.

Al igual que la desviación de la luz, otros fenómenos escapan del alcance predictivo del MMN. Un ejemplo sería el avance del perihelio de Mercurio. Este planeta, dada su proximidad al Sol, detecta los efectos del campo gravitatorio de manera mucho más significativa, razón por la que el MMN no es capaz de dar

⁷⁰ Pese a la ineficacia del MMN en dominios en los que actúan campos gravitacionales intensos, como es el caso de los agujeros negros, Newton, en lo que respecta al desplazamiento de la luz, ya había considerado la posible desviación de un fotón como consecuencia directa de su teoría gravitatoria. En su *Optiks (Libro III, Pregunta 1)*, Newton introduce la siguiente cuestión: «¿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 $\alpha = 0''.87$, el cual muestra solo la mitad del valor observado. Por su parte, Einstein, predijo en 1916 que «los rayos de luz se propagan de modo curvilíneo en campos gravitacionales» (Einstein 1999, pág. 65), cuya formulación viene dada por: $\alpha = 4Gm_{\odot}/r_{\odot} c^2 \text{ rad}$. Al resolver, se obtiene un valor de $1''.75$. A esto, Einstein añade: «Aunque un examen detallado de la pregunta muestra que la curvatura de los rayos de luz requerida por la teoría de la relatividad general es muy pequeña para los campos gravitacionales de los que disponemos en la práctica, su magnitud estimada para los rayos de luz que pasan al Sol en incidencia rasante es sin embargo 1.7 segundos de arco. Esto debe manifestarse de la siguiente manera. Como se ve desde la Tierra, ciertas estrellas fijas parecen estar en las proximidades del Sol, y por lo tanto son capaces de ser observadas durante un eclipse total. En esos momentos, estas estrellas deberían aparecer desplazadas hacia afuera del Sol en la cantidad indicada anteriormente, en comparación con su posición aparente en el cielo cuando el Sol se encuentra en otra parte del cielo. El examen de la corrección o, dicho de otro modo, de esta deducción es un problema de la mayor importancia, cuya solución inicial es de esperar por parte de los astrónomos» (*Op. cit.*, págs. 65-66).

cuenta de la lenta precesión de su órbita, ya que no considera la participación de otras fuerzas⁷¹.

Las limitaciones del MMN en su aplicabilidad universal se asientan en nuestro intento de exceder su dominio empírico. Durante más de dos siglos, el MMN se adaptó a nuestro modo de entender el mundo físico, un mundo que apelaba a la relación de causa-efecto y que se disfrazaba bajo la metáfora del universo como una gran maquinaria. El éxito predictivo del MMN residía precisamente en ese aspecto, lo que le permitió esbozar una imagen del mundo que perduró hasta principios del siglo XX. Desde entonces, los nuevos desafíos reinterpretados por el MRE, como el avance del perihelio de Mercurio, la desviación de la luz por el Sol, el corrimiento gravitacional hacia el rojo, etc., trascendieron el dominio empírico para el cual el MMN fue diseñado.

La gravedad newtoniana tiene características, como las órbitas elípticas, que coinciden con nuestro universo. La relatividad tiene otras características que el sistema de Newton no tiene. El Universo probablemente no usa ni un modelo ni otro para llevar a cabo sus fines, pues tanto el modelo newtoniano como el de Einstein son modelos para los cerebros de los hombres, no verdaderas últimas⁷² (Stewart 2000, pág. 285).

El triunfo del MRE a la hora de resolver nuevos problemas interpretados por la física moderna no niega la efectividad del MMN en aquellos dominios para los cuales este último fue concebido⁷³. En el caso de la métrica de Schwarzschild, esta

⁷¹ En 1913, se encontró la evidencia de que un planeta estaba formándose a una distancia de 7,5 billones de millas (80 UAs) de TW Hydrae, una estrella T-Tauri (TTS) con $0.6 M_{\odot}$ y $1.11 R_{\odot}$, en la constelación de Hydra. Este nuevo escenario no solo contradice los principios teóricos del MMN, sino que además desafía por completo nuestra comprensión de la formación planetaria.

⁷² La traducción es mía.

⁷³ Un ejemplo a la inversa sería la ineficacia predictiva del MRE a la hora de formular el problema de dos cuerpos en rotación. El MMN, permite interpretar este problema como si de un solo cuerpo se tratase. Por el contrario, si intentamos resolver este problema utilizando el MRE, nos encontraremos con serias dificultades, ya que este no permite postular una relación a distancia.

sugiere una solución para un campo gravitacional externo de un cuerpo estacionario, descargado, no giratorio y esféricamente simétrico. Esta solución es una aproximación razonable para fotones, pero inadecuada para estrellas binarias donde las masas pueden ser de magnitud similar. En un agujero negro de Schwarzschild, la masa es estacionaria y altera el campo gravitacional, y por tanto, la geometría del espacio-tiempo, razón por la que las entidades teóricas sobre las que opera el MMN, como el espacio absoluto, el tiempo y el movimiento, desaparecen. Por el contrario, en el MRE, el espacio y el tiempo dejan de proporcionar un fondo fijo y absoluto, razón por la que el tiempo puede sufrir expansiones y el espacio concebirse tan dinámico como la materia. Como resultado, la noción de fuerza como explicación de los fenómenos gravitacionales pasar a describirse en términos de la geometría curva del espacio-tiempo debido a la presencia de cuerpos masivos.

Esta incompatibilidad interteórica 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

Por otro lado, el problema de tres cuerpos, y más generalmente de $n \geq 3$ cuerpos, no puede resolverse con el MMN.

verdad [...] En el otro ámbito de gravitación y cosmología [...] a menudo podemos ignorar los fenómenos cuánticos» (Smolin 2007, pág. 5).

4.2.3. El paradigma cuántico

Vemos el mundo a través de un cristal oscuro.

WOLFGANG PAULI

Durante las primeras décadas del siglo XX, el desarrollo de la teoría cuántica por parte de físicos como Niels Bohr, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg supuso una ruptura del paradigma mecanicista que redefinió por completo las nociones de espacio, tiempo y de la realidad misma. La exploración del mundo cuántico llevada a cabo durante el siglo XX puso de manifiesto la inusitada limitación de la mecánica clásica, originando una revisión radical de los postulados heredados. Esta ruptura en 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.

A comienzos del siglo XX, 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 advirtiéndolo 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 tierra⁷⁴» (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

⁷⁴ La traducción es mía.

sólido sobre el cual poder construir» (Einstein, cit. en Schilpp 1949, pág. 45). Las nuevas resoluciones experimentales gestadas 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 y efecto, etc. De estos cambios emergió una nueva visión del mundo que incorporó nuevas perspectivas con las que abordar el estudio de la realidad.

La gran tensión que hemos soportado durante los últimos años ha demostrado la insuficiencia de nuestras simples concepciones mecanicista y, como consecuencia de ellos, ha hecho que se tambaleen los cimientos sobre los que estaba basada la interpretación usual de nuestras observaciones» (Bohr 1934, pág. 2).

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

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 afirma:

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 significado⁷⁵ (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 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 gozaban los modelos científicos utilizados hasta la fecha. La nueva conciencia científica se originó en medio de la certidumbre 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. En estrecha relación con el principio de indeterminación de Heisenberg, el principio de complementariedad buscaba resolver el problema de la dualidad onda-corpúsculo de la materia subatómica.

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

⁷⁵ La traducción es mía.

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).

Asimismo, más adelante, el mismo Bohr introduce la siguiente reflexión:

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 física⁷⁶ (*Op. cit.*, pág. 89).

El giro conceptual que demandaba la ciencia moderna estribaba en el hecho de que las pretendidas descripciones de la realidad cuántica quedaban estrechamente ligadas al contexto humano de la experimentación.

El papel clave que desempeñan las observaciones en física cuántica lleva inevitablemente a cuestiones sobre la naturaleza de la mente y la conciencia y sus relaciones con la materia. El hecho de que, una vez se ha hecho una observación sobre un sistema cuántico, su estado (función de ondas) cambiará en general bruscamente, parece familiar a la idea de “la mente sobre la materia”. Es como si el estado mental alterado del experimentador, al ser consciente del resultado de la medida, de algún

⁷⁶ 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).

modo se reintrodujera en el aparato del laboratorio y, por lo tanto, en el sistema cuántico, alterando también su estado. Brevemente, el estado físico actúa alterando el estado mental y el estado mental retroactúa sobre el estado físico (Davies & Brown 1989, págs. 47-48).

4.2.3.1. *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 temperatura⁷⁷. 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 $a_\lambda \neq 0$ 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, es decir, un modelo, pues no existen cuerpos negros perfectos en la naturaleza. Las estrellas no son cuerpos negros, ya que estas no se encuentran en equilibrio termodinámico. Además, las partículas que las constituyen colisionan continuamente entre sí e interactúan con

⁷⁷ Esta idea se expresa a través de la radiación térmica de Kirchhoff: $\frac{\epsilon_\lambda}{a_\lambda} = K_\lambda(T)$, en la que $a_\lambda = \epsilon_\lambda$, Siendo la distribución de intensidad K_λ una función universal que depende únicamente de la temperatura y la longitud de onda.

el campo de radiación absorbiendo y emitiendo fotones. Ahora bien, aunque las estrellas no sean cuerpos negros genuinos, el modelo de cuerpo negro resulta en sí extremadamente útil, ya que es utilizado en el estudio de la emisión de luz estelar y en el cálculo de la temperatura de la superficie solar. Veámoslo.

Suponiendo que el Sol sea un cuerpo negro, la energía total emitida por la unidad de superficie y tiempo viene 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, y viene dada por: $\ell = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$. Como las estrellas no obedecen fielmente a un cuerpo negro, en la fórmula de la luminosidad, 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 es 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 es realmente exitosa para calcular la temperatura de la

superficie solar. Este es un ejemplo de cómo el éxito predictivo de un modelo no está vinculado a un presunto valor representativo. Veamos otro ejemplo.

Suponiendo que las estrellas fueran 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 será 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. Cito a Helmholtz:

Esto se muestra cuando la luz fuerte que sale de un cuerpo caliente, el Sol, por ejemplo, pasa a través del vapor. Luego, como consecuencia de la absorción máxima, las líneas oscuras aparecen exactamente en las mismas

posiciones del espectro en las que las líneas claras están ubicadas en el espectro de emisión (Helmholtz 1922, pág. 167).

Al comparar los espectros de las estrellas con los espectros de los elementos conocidos obtenidos en el laboratorio, podemos determinar su composición. El espectro de una estrella es una característica distintiva de esta. Los espectros estelares, con un corrimiento hacia el violeta o hacia el rojo, de acuerdo con la temperatura mayor o menor de la estrella, se comportan como se espera que lo hagan de acuerdo con la ley del desplazamiento de Wien, lo que indica que el modelo de cuerpo negro es predictivamente exitoso para el estudio de la radiación de las estrellas.

4.2.3.2. El éxito empírico de los modelos nucleares: El modelo de gota líquida y el modelo nuclear de capas

Como ya hemos visto, los modelos que operan en diferentes dominios de aplicabilidad pueden estar constituidos por entidades y postulados teóricos incompatibles entre sí, algo que ocurre, como hemos podido comprobar, entre el MMN y el MRE. En el MMN, las entidades teóricas como espacio absoluto, tiempo o movimiento desaparecen. Por el contrario, en el MRE, el espacio y el tiempo no proporcionan un fondo fijo y absoluto, ya que el tiempo puede sufrir expansiones y el espacio se convierte en algo tan dinámico como la propia materia, se mueve y se transforma. Al igual que ocurre entre el MMN y el MRE, los modelos que operan en el ámbito de la microfísica pueden presentar contradicciones teóricas entre los términos que constituyen sus postulados. Como ejemplo de un modelo de este tipo, podemos traer a colación el modelo atómico propuesto por Bohr en 1913, en el que introdujo su ecuación de equilibrio, la cual permitió salvar algunas de las deficiencias presentadas por el modelo atómico de Rutherford.

Al modelo de Bohr precedieron otros muchos modelos, como los propuestos por John W. Nicholson y Arthur E. Haas, quienes en 1910 mostraron que la relación $hv = e^2/r$ se cumple para un electrón con carga eléctrica e y que oscila en un

átomo de hidrógeno de radio r , siendo h la constante de Planck. Los modelos atómicos popularizados por Nicholson y Haas atrajeron la atención de Bohr y lo estimularon para buscar un modelo atómico más satisfactorio: el modelo nuclear de gota líquida.

Este Modelo Nuclear de Gota Líquida [MNGL], propuesto independientemente por Niels Bohr y Jakov Ilich Frenkel en 1936, no busca representar la compleja estructura interna del núcleo atómico, sino salvar las energías de enlace neutrón-protón, así como algunos aspectos de los estados excitados del núcleo atómico que se reflejan en los espectros nucleares. Este modelo describe el núcleo atómico como una gota de fluido de alta densidad. Pero en esta escala nuclear, el fluido está hecho de nucleones – protones y neutrones – que se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte. Los nucleones internos están completamente rodeados por otros nucleones atrayentes. 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.

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:

$$m_N = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{B}{c^2}$$

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, 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:

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

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):

$$\Delta E/A \approx \text{constante}$$

El éxito predictivo que puede presentar el MNGL reside en que este salva la denominada fórmula de masa empírica para la energía de unión nuclear, propuesta esta por Carl F. von Weizsäcker en 1935; sin embargo, el MNGL no permite dar cuenta de la estabilidad inusualmente alta de los llamados números mágicos.

En física nuclear, un número mágico corresponde a la cantidad de nucleones — ya sean protones o neutrones— de un núcleo atómico con mayor estabilidad frente a la desintegración nuclear. Los siete números mágicos reconocidos hasta la fecha son 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126. En 1950, Goepfert-Mayer postuló un modelo matemático para la estructura de las capas nucleares que daba cuenta de por qué ciertos números de nucleones en el núcleo atómico poseen una configuración particularmente estable:

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 caber 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 contrario⁷⁸ (Goepfert-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

⁷⁸ La traducción es mía.

electrones circundantes, ocupando capas y subcapas, cada una de las cuales afecta solo a la otra levemente.

La idea de que los nucleones se agrupan en capas permite salvar la existencia de estos números mágicos. 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. 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. Las capas deben entenderse en abstracto y no como capas físicas. 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 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. En el MNC, las propiedades nucleares se describen a partir de la interacción de un nucleón con un potencial efectivo; por ejemplo, no se considera la interacción nucleón-nucleón, sino la interacción de un único nucleón con un potencial generado por el resto de nucleones. Este modelo ofrece un gran éxito predictivo para el núcleo atómico. Para casi todos los núcleos con A desapareada en estado fundamental – con el estado de energía más bajo – , este modelo proporciona resultados que concuerdan con valores experimentales de propiedades como el espín y resultados aproximados para otras propiedades como el momento dipolar magnético y el momento eléctrico cuadripolar.

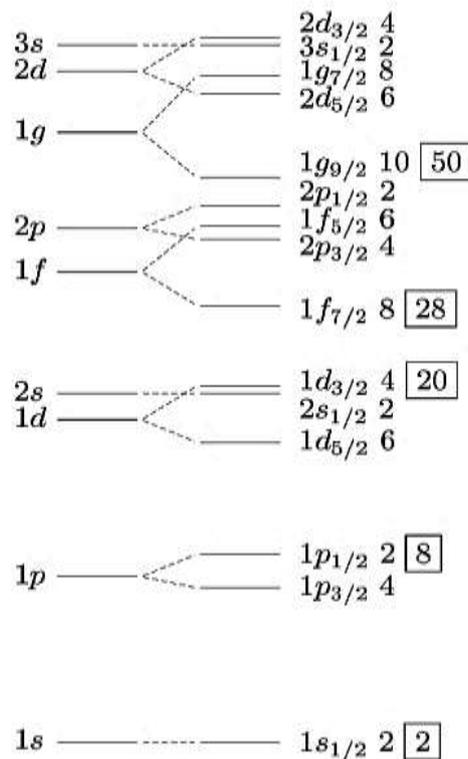
Además, el MNC también se muestra notablemente exitoso en el cálculo de la probabilidad de transición entre diferentes estados del núcleo. Tomando en consideración la interacción de un solo nucleón con un potencial medio que representa la ligadura nuclear:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi,$$

y siendo $\hat{H} = -\hbar^2/2\mu + V$, es necesario comprobar con potenciales con una solución conocida para la ecuación de Schrödinger y comparar 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:

$$V(r) = -\frac{V_0}{1 + e^{(r-R)/t}}$$

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:



Como puede comprobarse, en la distribución de niveles aparecen las capas completas que reproducen los números mágicos.

El análisis anterior revela la existencia de modelos matemáticos mutuamente incompatibles cuyo cometido por separado consiste en salvar un conjunto determinado de fenómenos, independientemente de si las entidades teóricas y

postulados subyacentes se muestren contradictorios entre sí. Esta incompatibilidad no es tal dentro de una posición constructivista de la ciencia, pues al ser la viabilidad funcional el único criterio que debe cumplirse, ambos modelos –MNGL y MNC– cumplen exitosamente con ese criterio. Es más, los nucleones no podrían moverse independientemente si el MNGL se aceptara como representación fidedigna del núcleo atómico. De igual modo, si los nucleones se mueven de forma independiente, tal y como sugiere el MNC de capas, este no podría ser válido para el núcleo atómico en su totalidad. Cito a Boniolo:

Los modelos microscópicos tratan con partículas independientes con una trayectoria libre media larga, mientras que los modelos colectivos justifican el tratamiento de la materia nuclear como un continuo, asumiendo los nucleones como partículas fuertemente correlacionadas con una trayectoria libre media muy corta. El choque entre estos dos enfoques es evidente, pero se vuelve menos dramático si los consideramos simplemente como meras actitudes mentales útiles para dibujar modelos matemáticos aptos para salvar fenómenos⁷⁹ (Boniolo 2002, pág. 447).

En otras palabras, la ciencia proporciona ejemplos excelentes de modelos destinados a salvar la distancia entre diferentes aspectos del mundo físico y su formalización matemática. Los casos analizados anteriormente dejan claro que cualquier parecido posible entre un modelo y la realidad es pura coincidencia, una conclusión que comparten también Eisber & 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

⁷⁹ La traducción es mía.

de modelos contrarios utilizados para la descripción de otros conjuntos (Eisber & Resnick 1985, pág. 545).

Al igual que los modelos nucleares de gota líquida y de capas se muestran predictivamente exitosos para estudiar diferentes aspectos del núcleo atómico, el modelo de cuerpo negro se muestra empíricamente válido a la hora de salvar determinados fenómenos astrofísicos, como la predicción de la distribución de intensidades de diferentes longitudes de onda producidas por la radiación del fondo cósmico de microondas, coincidiendo con gran precisión esta última con las emisiones de un cuerpo negro. En el dominio de la física nuclear, la ausencia de una teoría completa del núcleo atómica obliga a la utilización de modelos matemáticos cuyos postulados teóricos puedan ser –y en ocasiones son– incompatibles entre sí. Mientras que el MNC permite salvar la existencia de los números mágicos, el MNGL líquida salva la fórmula de derivación de Weizsaecker –la denominada fórmula de masa semiempírica–, útil para salvar la estabilidad de los núcleos y predecir su energía de unión.

Como conclusión, podría decirse que los modelos nucleares se revelan como constructos matemáticos diseñados para fines muy específicos en el ámbito de la microfísica. Además, la incompatibilidad de los postulados teóricos de ambos modelos –MNGL y MNC– niega la posible existencia de un modelo nuclear unificado que explique de manera fiable la estructura del núcleo atómico. Una vez más, hablar de modelos matemáticos verdaderos o falsos carece de sentido, pues los modelos en ciencia no proporcionan ninguna explicación metafísica acerca de las entidades y fenómenos estudiados.

5. CONCLUSIÓN

Si bien la ciencia se ocupa del estudio de la realidad física, en la práctica los científicos utilizan sistemas simplificados e idealizados que incorporan tan solo aquellos rasgos del fenómeno estudiado considerados relevantes a la luz de las hipótesis de partida. Estos sistemas son los modelos, artificios matemáticos destinados a salvar la distancia entre el mundo físico y una serie de enunciados

formalizados matemáticamente, entendiéndose salvar la distancia como el hecho de reducir el comportamiento de un fenómeno natural a su formulación matemática.

Los modelos en ciencia distan mucho de ofrecer una descripción literal de cómo es el mundo. Es más, entre el sistema simplificado – el modelo – y el sistema real – la realidad física – «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 un valor a partir de una medición puede establecerse una correspondencia biunívoca entre aquellas 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 viabilidad del modelo. Por esta razón, dado un sistema real, resulta posible la existencia de una multiplicidad de modelos que den cuenta predictiva de este. Cada modelo puede diferir con respecto a los demás en la elección de aquellas variables consideradas como relevantes, razón por la que la elección de un modelo frente a otro responde en la mayoría de los casos a un interés concreto, ya que esta obedece en última instancia a los objetivos marcados por la propia investigación.

La concepción mecanicista del MMN, según la cual todos y cada uno de los fenómenos físicos podían describirse atendiendo a la materia y el movimiento, se encontraba íntimamente relacionada con un riguroso determinismo, ya 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. Asimismo, al adentrarnos en el reino de la física cuántica, los modelos destinados al estudio de los fenómenos macrofísicos comienzan a presentar serias deficiencias predictivas, por lo que resulta necesario incorporar modelos nuevos que permitan dar cuenta de los fenómenos originados en este nivel de realidad. El MNGL y el MNC perviven como ejemplos de modelos nucleares con los que salvar por separado distintos aspectos del mundo subatómico, por lo que, y a pesar del notable éxito predictivo de sus postulados, resulta ilógico presuponer que ninguno de ellos pueda erigirse como un modelo nuclear unificado que describa de manera fiable la estructura del núcleo atómico.

Es indudable que la ciencia ha conseguido desarrollar un poderoso cuerpo de conceptos y estrategias teóricas con las que intervenir predictivamente en el mundo físico y extraer regularidades en el comportamientos de los fenómenos observados. Este desarrollo no solo ha favorecido notablemente el éxito dentro de la propia comunidad científica, sino que además ha ganado un profundo impacto en todo el conjunto de la sociedad, sobre todo en lo relativo a nuestro modo de pensar sobre el mundo. Ahora bien, lo que convierte realmente a los modelos en herramientas poderosas es su capacidad predictiva a la hora de estudiar la realidad. Este proceso de modelización de la realidad, es decir, de reducir esta a su síntesis cuantitativa, encuentra su justificación epistemológica en el constructivismo, donde el éxito de un modelo se adscribe a las categorías de viabilidad y funcionalidad, siendo el conocimiento la construcción de relaciones funcionales entre el mundo físico y su formalización matemática con ánimo de satisfacer una meta predictiva.

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 esencia misma de 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 dotar de estructura verbal los descubrimientos y resultados de la investigación, así como reconfigurar nuestros juicios y aseveraciones sobre cómo funciona 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*, entre otros. 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 en estructura y funcionamiento con 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 elementos compositivos de la oración —el léxico— y sus aparentes reglas combinatorias —la sintaxis— cobraba especial importancia.

A pesar del enorme impacto que muchas de estas traducciones tuvieron 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 muchos otros, 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, desarrolló un profundo 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 se convirtió en el puente entre lo subjetivo y lo objetivo al permitir la relación entre ambos. Así lo expresa el mismo Cassirer:

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 el terreno de la 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 proceso 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 a partir de factores 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.

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 bautizó con el nombre 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. Asimismo, estos estenosignificados no responden a una decisión arbitraria, sino que se templan a lo largo de una dilatada y compleja fase de observación y experimentación. 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 obedecen a construcciones mentales que, aunque de origen sensible, una vez definidas, encierran un significado conceptual que permite sintetizar nociones complejas, facilitando así la formalización matemática del comportamiento del fenómeno en el que estén involucradas.

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 mecánica, por ejemplo, la noción de masa nace como un estenosignificado surgido a partir de observaciones concretas. Las propiedades medibles —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 es cierto, la ciencia no se limita solo a estudiar el mundo sensible, sino que profundiza, va más allá, con el fin de extraer regularidades y salvar las apariencias. Durante este proceso se construyen nuevas entidades abstractas que quedan fuera de la observación, pero que tienen su origen en las propiedades últimas de la materia.

Mencionemos como ejemplo la asignación de una masa a los cuerpos, que es el acto que pone en marcha la ciencia de la mecánica. La apócrifa experiencia de Newton en el huerto de Woolsthorpe le condujo fácilmente al objeto de la manzana; sin embargo, asignar una masa a la manzana constituyó otro paso; y al darlo Newton pudo formular las leyes del movimiento, la ley de la gravitación universal, etcétera (Margenau 1970, pág. 62).

El proceso de construcción de un lenguaje apropiado no limita a describir la parcela de realidad observable, ya que no solo debe dar cuenta de nuestra captación sensible. Pongamos como ejemplo 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.

Podría decirse que el discurso científico se diferencia del discurso cotidiano en la medida en que el primero confiere a los mismos términos una mayor precisión semántica, así como un mayor campo de significación. A medida que la investigación penetra cada vez más en el estudio de las propiedades últimas que rigen la materia, poco a poco el discurso 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 último capítulo examinaré el papel que asumen la analogía y la metáfora como en nuestro modo de interpretar y representar el mundo, sobre todo en lo relativo a su papel durante la fase de modelización. La historia de la ciencia es el acopio de esfuerzos conjuntos por dotar de estructura coherente una formulación

objetiva del mundo. La dimensión simbólica del lenguaje matemático ha facilitado esta formulación a través de modelos que, pese a operar desde el plano simbólico, permiten ampliar nuestro conocimiento del mundo gracias a la capacidad predictiva de sus postulados. La simbología matemática, materializada lingüísticamente a partir de fórmulas y ecuaciones, permite tender un vínculo entre el lenguaje y el mundo, un vínculo en el que la intuición y la creatividad se valen del razonamiento analógico y el pensamiento metafórico como estrategias cognitivas clave con las que vertebrar una imagen coherente del mundo circundante.

La idea de que la ciencia obedece a una extensión de nuestra apertura cognitiva al mundo, rompe con toda propuesta que apele a la analogía y la metáfora como una extralimitación 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 es el reconocimiento de patrones, por lo que su inclusión – analogía y metáfora – dentro de todo programa de investigación precisa una reconsideración acerca de su naturaleza como estrategias tropológicas responsables de nuestro modo de interpretar y representar el mundo que nos rodea.

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 una de estas tres nociones por parte de innumerables autores ha sido objeto de profundo debate, por lo que un examen en profundidad acerca de la naturaleza terminológica de cada una de ellas, así como de su posible repercusión en los distintos ámbitos de la epistemología científica, requeriría un tratado aparte. Por tanto, y en lo que respecta a su significación, me centraré en proveer únicamente una definición rigurosa que delimite semántica y conceptualmente su comprensión dentro del marco teórico que presenta 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 fórmula matemática. Al igual que cualquier vocablo o expresión, esta está constituida por una concatenación de símbolos formalizados objetivamente sujetos a una codificación conceptual, una semántica, así como operacional y relacional según procedimientos combinatorios, una sintaxis. Ahora bien, además esta modalidad semántica y sintáctica del lenguaje, existe una tercera modalidad lingüística, una modalidad que nos permite emplear signos en función de su aparente relación sensible e inmediata con su respectivo significado: una modalidad analógica.

En muchas de las obras de eminentes científicos pueden encontrarse importantes elementos analógicos de razonamiento. Valga como ejemplo la descripción que el físico Freeman Dyson hace del trabajo de Richard Feynman:

La razón por la que sus propuestas eran tan difíciles de captar por los físicos ordinarios era que no usaban ecuaciones [...]. Tenía una visión intuitiva de cómo ocurren las cosas, que le daba las soluciones directamente con un mínimo de cálculo. No me sorprende que los que habían pasado sus vidas resolviendo ecuaciones estuviesen desconcertados por sus ideas. Sus mentes eran analíticas; la suya, pictórica. (Fernández-Rañada 2003, pág. 65).

De un modo similar, 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 nuestro cerebro nunca podrá ser emulado a la perfección por una máquina que funcione sobre los principios computacionales actuales. El razonamiento analógico parece obedecer a alguna de estas leyes, pues este no puede reducirse a una serie de reglas prefijadas, por muy complejas que estas sean, ya que, aun siendo posible construir sistemas que cumplan con éxito tareas complejas, la construcción de una máquina inteligente que opere analógicamente, tal y como sugiere Penrose, no resulta tarea fácil.

En este sentido, el pensamiento, entendido este como sucesiones lineales de cadenas de inferencias lógicas, excluye importantes inferencias de otra

naturaleza dominadas por el razonamiento analógico. 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 del mundo que no puede reducirse a una serie de encadenamientos lógicos sin perder parte de su significado. ¿Alguien podría decir que es capaz de reducir *El sueño de la razón* de Goya o *La Victoria de Samotracia* a un conjunto de argumentos racionales? ¿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, tanto a nivel estructural como relacional, 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 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, uno a nivel estructural y otro a nivel relacional, entre el átomo y el sistema solar a partir de la siguiente metáfora: *Un átomo es un sistema solar en miniatura*⁸⁰. Haciendo uso de la terminología de Lakoff y Johnson (2017), el átomo correspondería al dominio meta (*target domain*) y el sistema solar 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 estas 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

⁸⁰ Años después de que Rutherford diera a conocer su tan polémica metáfora atómica, Niels Bohr destacó el carácter simbólico de esta aludiendo que la trayectoria orbital de los electrones en torno al núcleo no refleja una realidad, sino que únicamente se sirve del modelo planetario para proyectar una serie de correspondencias analógicas que sirven de referencia orientativa en el estudio de la disposición de la materia subatómica.

evidente que un átomo no está diseñado a imagen y semejanza del 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 sí permite dotar de estructura inferencial la noción de átomo en nuestro esquema cognitivo conforme a una perspectiva: una serie de entidades orbitando (electrones y planetas) –identidad estructural– en torno a un punto de masa central (núcleo y Sol) –identidad relacional–. Estas correspondencias parciales de identidad son lo que, en lo sucesivo, denominaré como analogías.

¿Y una metáfora? Una metáfora es una estrategia cognitiva que permite poner en interacción dos dominios de experiencia partir de una serie de correlaciones parciales de identidad, es decir, de analogías.

La metáfora es un procedimiento intelectual por cuyo medio conseguimos aprehender lo que se halla más lejos de nuestra potencia conceptual. [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 1963, pág. 391).

Como testimonio ilustrativo de las palabras de Ortega, 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 de los fenómenos electromagnéticos responde a 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 cuyos postulados y entidades teóricas permiten acometer predictivamente el comportamiento de un fenómeno o conjunto limitado de fenómenos a partir del cálculo. Los modelos funcionan como conjuntos de hipótesis que permiten inferir las propiedades y patrones de comportamiento de un aspecto concreto 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.

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 modelo por la ruta de la modelización cuantitativa (Mosterín 2013, pág. 130).

Al mismo tiempo, los modelos facilitan el estudio aspectos del mundo que trascienden las fronteras de la experiencia sensible, 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. Muchos autores consideran que la analogía responde a un tipo de metáfora que funciona

como una correspondencia de conocimiento (Gentner & Jeziorsky 1993). Otros sugieren que se trata de una propiedad central que se da en todas las relaciones de modelación (Harré, Aronson & Way 2000). Algunos incluso admiten la utilidad predictiva de los modelos pero rechazan la inclusión de metáforas en ciencia, ya que sugieren que, al poner en interacción una serie de correlaciones parciales de identidad deliberadamente elegidas entre ambos dominios, la proyección analógica siempre tiene lugar entre dos dominios configurados previamente al momento de la proyección (Bartha 2010; Rivadulla 2006). Otros, en contraposición, consideran que es precisamente en la fase previa a la configuración de un modelo donde la metáfora desempeña un papel crucial, ya que esta no solo permite, en virtud de un ejercicio analógico de fondo, establecer correlaciones parciales de identidad entre dos dominios previamente conceptualizados (Bartha 2010; Holyoak & Thagard 1995; Rivadulla 2006, 2011), sino además dotar de alcance inferencial un nuevo dominio sin darse siquiera correspondencias analógicas previas (Bustos 2000, 2013). Por su parte, Black (1966) considera que el empleo de modelos se asemeja al uso de metáforas al requerir la transferencia analógica de un vocabulario. Sin ser lo mismo, analogías, metáforas y modelos imponen categorías al mundo a partir de las cuales percibimos lo que, en ocasiones, es incognoscible. Aun con todo, considero importante matizar que la principal diferencia que mediaría entre el concepto de analogía y el de metáfora es que la primera refleja una correspondencia parcial de identidad a partir de la estructura y relación que presentan las propiedades cognoscibles en ambos dominios, mientras que en la metáfora predomina la apertura significativa del observador —del científico—, así como su capacidad creativa para extender su propia percepción del fenómeno.

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 todo, pongamos por caso, físico teórico, consiste en manipular axiomáticamente 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. Pero, pese a ser esta la imagen generalizada que se tiene de la investigación científica, esta no responde más que a un mito. A la hora de reconstruir el periplo intelectual que ha llevado a algunos de los mayores científicos de la historia a sus mayores descubrimientos, puede apreciarse el papel crucial que la analogía ha asumido al permitir vincular un fenómeno recién descubierto con otro mucho más antiguo.

El concepto 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 noción para extender su significado al discurso filosófico y así 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). Santo Tomás retoma los postulados del Estagirita y sugiere que «siempre que hay alguna comparación es preciso que exista allí alguna forma que sea poseída según un más o un menos, o de modo igual por muchos» (Santo Tomás 200, pág 107). Para el Aquinate, «en todas las cosas análogas o bien una entra en la definición de otra, como por ejemplo la sustancia entra en la definición del accidente y el acto en la definición de la potencia, o bien algo idéntico entra en la definición de ambas» (*Op. cit.*, pág 108). Así lo expone en *De principiis naturae*:

También se debe saber que hablando de los principios intrínsecos, esto es, de la materia y de la forma, según es la conveniencia y diferencia de las cosas que incluyen los principios, así es la conveniencia y diferencia de los principios. Porque algunas cosas son lo mismo numéricamente, como Sócrates y este hombre, una vez mostrado Sócrates; pero otras son diversas en número y lo mismo en la especie, como Sócrates y Platón que, aunque convengan en la especie humana, difieren, sin embargo, numéricamente. Algunas cosas, por su parte, difieren en la especie, pero son lo mismo en el género; así, el hombre y el asno convienen en el género animal. A su vez, algunas cosas son diversas en el género, mas son lo mismo solamente según la analogía; así, la substancia y la cantidad, que

no convienen en género alguno sino solo según la analogía. Pues convienen únicamente en ser entes; y el ente, por su parte, no es un género, puesto que no se predica unívoca sino analógicamente (Santo Tomás 1962, pág. 53).

A lo largo de la historia del pensamiento, la analogía ha demostrado ser una estrategia cognitiva tremendamente útil, ya que su utilización ha obedecido siempre a un doble propósito: en primer lugar, facilitar la construcción de una teoría (valor heurístico) y, en segundo, ayudar a interpretar una teoría ya desarrollada en función de otra con una estructura matemática similar (valor hermenéutico). Esta similitud matemática pervive en el basamento teórico del modelo utilizado en la investigación. La analogía permite vislumbrar las propiedades de un sistema cuya estructura real se desconoce. Para ello, se configura un modelo que dé cuenta del fenómeno estudiado gracias a una analogía adecuada entre la formalización matemática del comportamiento percibido de ese fenómeno y la realidad física.

Además de un valor heurístico, la analogía conserva un valor hermenéutico al facilitar la descripción del comportamiento de un fenómeno a partir de un modelo determinado: el modelo cinético es a las leyes de la mecánica lo que el modelo termodinámico a las leyes de la termodinámica. Si asumimos la analogía, resulta posible identificar las leyes de la teoría cinética con las de la termodinámica dentro de un margen de error aceptable, e identificar conceptualmente la temperatura termodinámica con la energía cinética de traslación de las moléculas en un gas.

A continuación, analizaré el papel que asume la analogía en ciencia, concretamente en el dominio de la física teórica, donde el razonamiento analógico ha contribuido notablemente a la configuración de modelos que, una vez verificados, han sido capaces de redefinir nociones tan elementales como masa, energía, espacio y tiempo.

3.1. La analogía en ciencia: La radiación del cuerpo negro⁸¹

Un espectro es un gráfico que muestra la variación de la energía de radiación en función de la longitud de onda. Al ser un cuerpo negro una cavidad hueca cuyas paredes se mantienen a una temperatura específica, Max Planck se dio cuenta de que su formulación matemática con la que buscaba describir con precisión el espectro de un cuerpo negro, podía deducirse a partir de la energía de vibración de los átomos en las paredes de la cavidad. Esta energía de vibración solo puede adoptar ciertos valores determinados dada la constante de Planck h , razón por la que un átomo no puede vibrar con cualquier cantidad arbitraria de energía, ya que este solo puede adoptar energías que sea múltiplos exactos de un cuanto. La idea de que la energía estuviera contenida en estos cuantos sacudió los cimientos de la comunidad científica, a pesar de que la formulación matemática de Planck ligada a esta idea coincidía con los resultados experimentales. La revolución analógica tuvo lugar cuando, a comienzos del siglo XX, Albert Einstein advirtió posibles correspondencias parciales de identidad entre un cuerpo negro y un sistema diferente que también poseyera un espectro determinado por su temperatura: un gas encerrado en el interior de un recipiente.

Algunas de las más audaces mentes científicas de aquel momento, como Ludwig Boltzmann o James Clerk Maxwell, ya habían conjeturado que un gas estaba compuesto de innumerables partículas corpusculares que chocaban entre sí y que a su vez rebotaban en las paredes que las contenían. De este gas ideal podían derivarse ciertas ecuaciones que predijeran con alto grado de precisión algunos de los fenómenos observados en gases reales. Ante esta propuesta, las analogías encontradas entre un gas ideal y una mesa de billar (ideal) –por supuesto, carente de fricción– se mostraron muy reveladoras. Si imaginamos un sinnúmero de minúsculas partículas puestas en movimiento por una intensa explosión, tal y como ocurre en el saque al comienzo de una partida de billar, y chocando las unas con las otras a la vez que lo hacen contra los bordes de la mesa, conociendo la

⁸¹ Cf. Hofstadter & Sander (2018, págs. 661 y ss.).

cantidad de energía de la explosión inicial — el saque —, sería posible calcular la velocidad media, así como la distribución de velocidades de dichas partículas, tal y como ocurre con las bolas de billar.

A partir del mismo tipo de razonamiento, Einstein intuyó una profunda relación entre un cuerpo negro y un gas ideal, una similitud matemática que ligaba ambas fórmulas de distribución de energía: 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. Yendo un paso más allá, Einstein decide extender esta relación presente entre un cuerpo negro y un gas ideal a cualquier otro sistema físico, por ejemplo, un líquido que contuviera partículas coloidales y cuyo incesante movimiento pudiera observarse a partir de un microscopio. Sobre la base de esta analogía, Einstein postula lo que a día de hoy se conoce como movimiento browniano, un movimiento aleatorio que se observa en las partículas que se hallan en un medio fluido, ya sea este líquido o gaseoso, como resultado de choques contra las moléculas de dicho fluido. Sobre esta analogía, Einstein desarrolla una serie de cálculos basados en la termodinámica. En primer lugar, Einstein decide calcular la entropía de cada uno de los sistemas para, acto seguido, transformar las dos fórmulas de entropía para que se vieran lo más parecidas posibles. En el mismo lugar, en la fórmula para el espectro de cuerpo negro, aparecía la expresión $E/h\nu$, siendo h la constante de Planck y ν la frecuencia de las ondas electromagnéticas. La expresión $E/h\nu$ 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 de estos corpúsculos poseía necesariamente $h\nu$ de energía, la mínima cantidad de energía asociada con la frecuencia ν .

3.2. La analogía en ciencia: El efecto fotoeléctrico

Tras postular la existencia de cuantos de luz —hoy día conocidos como fotones—, Einstein decide extrapolar sus elucubraciones teóricas al terreno de la resolución experimental. Esto le lleva a estudiar el llamado efecto fotoeléctrico, un fenómeno descubierto y descrito por el físico alemán Heinrich Hertz en 1887. El basamento teórico sobre el que se fundamentaban los cuantos de luz permitía predecir en una sola ecuación la eyección de electrones de un metal como 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—, le transfiere a esta parte de su energía cinética y momento, pero no de la manera predicha por las ecuaciones de Maxwell. Una vez más, la analogía cuántica —de cuantos— de Einstein revolucionó el campo de la física dotando experimentalmente de estructura corpuscular la luz.

3.3. La analogía en ciencia: La teoría de la relatividad

En 1905, cuando Einstein se encontraba inmerso en el desarrollo de su teoría de la relatividad especial, y miraba con otros ojos el principio de relatividad galileana, decidió introducir en este último un desplazamiento analógico en horizontal y así mostrar que los postulados galileanos no solo se presentaban predictivamente exitosos en el dominio de la mecánica, sino también en el del electromagnetismo⁸² (Hofstadter & Sanders (2018, págs. 661 y ss.). Según Galileo:

⁸² La jugada analógica de Einstein podría pensarse de horizontal al considerar el desplazamiento del principio relativista galileano del dominio de la mecánica al del electromagnetismo; aunque, desde otro punto de vista, también podría decirse que se trató de un desplazamiento vertical al

La experiencia muestra todo lo contrario [...] La piedra [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, en principio limitado a los fenómenos mecánicos, a todo el conjunto de fenómenos ópticos y electromagnéticos. En palabras de 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 probable⁸³» (Einstein 2014, pág. 15-16). Este desplazamiento analógico del principio de relatividad galileana a todos los fenómenos físicos 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 considera que cualquier objeto que emite energía en forma de luz pierde una pequeña cantidad de su masa. Para ello, se vale de un experimento mental en el que imagina un objeto que emite dos destellos de luz en direcciones opuestas, por ejemplo, una linterna con una bombilla en cada uno de los extremos. Einstein intuye que, dado que un destello de luz posee cierta cantidad de energía, y debido a que la energía se conserva en todos los procesos físicos (mecánicos, electromagnéticos, etc.), la linterna debería perder indefectiblemente parte de la energía. Según Einstein, todo proceso de

reemplazar la expresión “cualquier tipo de experimento mecánico” por “cualquier tipo de experimento físico”.

⁸³ La traducción y cursiva son mías.

radiación de energía E de cualquier tipo involucra una pérdida de masa igual a E/c^2 , así como siempre que un objeto absorbe una cantidad E de energía entrante, gana una cantidad de masa equivalente a E/c^2 . Esta intuición de que todas las formas de energía liberada (térmica, cinética, etc.) son equivalentes, condujo finalmente a Einstein a intuir que la masa, al ser una propiedad fija de un objeto físico, no podía desaparecer como si nada, ya que esta es invariante, a menos que se desprendan partes de ese objeto. La famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$ parecía indicar que cualquier objeto debía perder o ganar masa al perder o ganar energía. Ante tal situación, Einstein distingue dos tipos de masa. Por un lado, la masa clásica m_c , que corresponde a la noción tradicional de masa, y, por otro, la denominada masa einsteiniana m_e , una nueva y contraintuitiva noción revelada por la ecuación $E = mc^2$. Esta división de la masa en dos es una imposición de la propia ecuación y no puede eludirse. Cito aquí a Hoffmann:

Einstein decía que toda la energía, de cualquier clase que sea, tiene masa. Hasta un hombre como él tardó otros dos años en llegar a la formidable conclusión de que lo recíproco tenía que es también cierto: que toda masa, de cualquier clase, debe tener energía. Lo que le impulsó a ello fueron razones estéticas [...] Imaginar dos tipos de masa, sin ninguna razón seria, cuando con una podría bastar [...] iba contra todo sentido artístico y no tenía defensa lógica posible. Por consiguiente, toda masa debe tener energía (Hoffmann 1987, págs. 98-99).

El fragmento de Hoffmann resulta muy ilustrativo para comprender el proceso mental que siguió Einstein. En primer lugar, Einstein teoriza sobre un posible la posibilidad de nuevo tipo de masa; en segundo lugar, ante esta aparente contradicción, Einstein decide extender y ampliar conceptualmente su nueva noción de masa, salvando la distancia entre esta y la de masa clásica y reestableciendo así la unidad conceptual.

En lo que respecta al experimento mental de la linterna, la masa que se desprende a través de los haces de luz proviene de esa m_e . Dado que ningún proceso de emisión ni absorción de luz afecta a la m_c , resulta lógico presuponer que ambos tipos de masa existen y que están desligados. Pero la firme creencia de Einstein

en la consistencia interna de la naturaleza y en la uniformidad y simplicidad de las leyes de la física, le llevó a intuir que cualquier objeto físico, ya fuera este un electrón o un planeta, podía desvanecerse en forma de m_e , concentrada esta en los rayos de luz en fuga. Esta idea era realmente rupturista, ya que 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 y descomunal cantidad de energía. En el experimento de la linterna, se puede comprobar que la m_e no solo se desvanece, sino que se transforma; es decir, antes de que se produjeran ambas fugas de luz, la m_e residía en los enlaces químicos de la batería de la linterna, mientras que ahora, tras la emisión de los rayos de luz, reside en las vibraciones de las ondas electromagnéticas de los haces de luz.

La volatilidad de este nuevo tipo de masa m_e , o lo que es lo mismo, su posibilidad de transformarse, impulsó a Einstein a considerar el principio de conservación de la energía, según el cual esta puede cambiar de forma, pero nunca aumentar o disminuir. En aquel momento, muchos experimentos ya habían mostrado que el calor —energía térmica— podía convertirse en movimiento —energía cinética— y viceversa. La m_e , al igual que la energía, parecía poder convertirse de una forma a otra sin necesidad de aumentar ni disminuir. Esta vinculación analógica entre la ley de conservación de la energía y la ley de conservación de la m_e permitió a Einstein establecer una correspondencia analógica entre ambas nociones —energía y m_e —.

La infatigable perseverancia de Einstein en la uniformidad de la naturaleza le impulsó cada vez más a pensar que la m_c debía, al igual que la m_e , poseer energía, tal y como afirmaba la ecuación $E = mc^2$. Es más, dada la constante multiplicativa c^2 , la más mínima transformación de m_c en m_e implicaría que una cantidad inimaginable de energía pudiera materializarse, al parecer, de la nada. En 1928, la incompatibilidad interteórica entre el paradigma cuántico y el paradigma relativista sentaría las bases para que el físico de origen inglés Paul Dirac introdujera el concepto de antipartícula —como el positrón, el antineutrón

o el antiprotón—. Años después, 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 las m_c del electrón y el positrón. Este descubrimiento mostró 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 . De este modo, tras veinticinco años de incesante investigación, la analogía de Einstein que ligaba la materia con la energía quedaba confirmada bajo verificación experimental.

Analícemos todo lo anterior de forma esquemática. En primer lugar, veamos qué ideas y nociones físicas empleadas por Einstein fueron feudatarias de la historia de la ciencia:

- Existen dos variedades de energía: la energía dinámica, debida al movimiento de los objetos y la oscilación de las ondas, y la energía potencial, debida a la posición relativa que ocupan los objetos.
- La energía potencial puede ser convertida en energía dinámica y viceversa.
- Todos los procesos físicos conservan la energía total en el sistema, y lo mismo ocurre con la masa.

Sabiendo esto, Einstein propone en 1905 lo siguiente:

- Si un objeto emite un haz de luz, este no solo pierde una cantidad de energía E , sino también una ínfima cantidad de masa, determinada esta por la ecuación $m = E/c^2$. Por analogía, si un haz de luz es absorbido por un objeto, este no solo adquiere cierta energía, sino también cierta masa, determinada por la misma ecuación.
- Un haz de luz que transporta cierta cantidad de energía E debe transportar también cierta masa m , determinada por la misma ecuación.

En este punto, Einstein intuye que no solo las ondas electromagnéticas poseen masa, sino también cualquier forma de energía dinámica. Por tanto, siempre que un objeto adquiera o pierda cierta cantidad de energía dinámica E , adquirirá o perderá cierta cantidad de masa m determinada, una vez más, por la misma ecuación.

- Existen dos variedades de masa en los objetos: la m_c , relacionada con la materia, y la m_e , relacionada con la energía.
- Dado que las unidades últimas, es decir, las partículas corpusculares que constituyen un objeto no mutan durante la emisión o absorción de energía, la m_c del objeto nunca varía.
- La energía contenida en un objeto posee m_e . Asimismo, a la inversa, la m_e contiene energía, cuya cantidad exacta es dada por la ecuación $E = mc^2$. La m_c de un objeto no participa en esta relación, por lo que la ecuación solo se aplica a la m_e .

Como conclusión:

- Masa y energía se conservan en todo proceso físico.
- La ecuación $E = mc^2$ conecta una cantidad dada de energía con la correspondiente cantidad de masa, por lo que masa y energía son propiedades análogas estrechamente relacionadas.
- Entre la energía estática y la masa clásica existe una cierta relación analógica –ninguna asociada al movimiento–, al igual que ocurre entre la energía dinámica y la m_e –ambas asociadas al movimiento–.

Ahora bien, esta división interna en el concepto de masa no tiene su contrapartida en lo que a energía se refiere, ya que todas las formas de energía son interconvertibles, algo que no ocurre entre las dos variedades de masa. Esta asimetría entre masa y energía genera cierta disonancia cognitiva a la hora de vincular analógicamente ambos conceptos. Con ánimo de restaurar la coherencia analógica, Einstein considera lo siguiente:

- Dada la analogía que liga materia y energía, al no existir una división entre los diferentes tipos de esta segunda, no tiene sentido pensar que sí exista para las dos variedades de la primera.
- Vale la pena considerar que ambas variedades de masa puedan ser interconvertibles.
- Al igual que la m_e , la m_c constituye una reserva de energía que puede transformarse en m_e , y viceversa. Un objeto puede desvanecerse siempre que su m_c se transforme instantáneamente en la misma cantidad de m_e .
- La cantidad de energía asociada con el desvanecimiento de una entidad material que posea masa m —es decir, la conversión de m_c en m_e — viene dada por la ecuación $E = mc^2$.

Estas correspondencias constituyen el núcleo de la analogía entre la masa y la energía en el pensamiento de Einstein, formalizada a partir de los cinco símbolos de su famosa ecuación: $E = mc^2$.

El siguiente paso de Einstein fue apostar por la idea de que estos principios sobre los cuales operaba su Modelo de Relatividad Especial [MR-E] no solo fueran aplicables en marcos de referencia con movimiento rectilíneo y uniforme, sino que debían extender su dominio de aplicabilidad a todos los marcos de referencia. Para ello, Einstein construye un universo infinito, completamente vacío salvo por un único observador. Este observador cree estar inmóvil; sin embargo, si estuviese girando, ¿sería posible determinar que quien gira es el observador y no el resto del universo? Si lo fuera, sería necesario que existiera un marco de referencia absoluto, ajeno al observador y al propio universo. Finalmente, y valiéndose de los estudios legados por Ernst Mach, Einstein llega a descartar la noción de movimiento absoluto de Newton y comienza a incorporar marcos de referencia acelerados en su MR-E y así mostrar que la aceleración, al igual que la velocidad, no es absoluta, sino que depende del marco de referencia escogido.

En la búsqueda de este principio unificador, Einstein idea un experimento mental en el que se imagina un vehículo en movimiento que acelera y desacelera, y cuyos pasajeros, sin embargo, consideran que se encuentran parados. En este escenario, tendría que ser posible postular la existencia de algún tipo de fuerza para justificar el vaivén del vehículo a la hora de coger una curva o la sensación de verse empujados hacia delante y hacia atrás al aumentar o disminuir la velocidad. Este tipo de fuerza es lo que se conoce con el nombre 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 esta idea, Einstein se propone unificar su teoría de la relatividad especial con el fenómeno de la gravedad. Los postulados sobre los que se erigía su teoría mostraban una estrecha analogía con 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 si las cargas eléctricas de ambos objetos son positivas, negativas u opuestas la una de la otra. Las cargas iguales se repelen mientras que las cargas opuestas se atraen. En el caso de la gravedad, la fuerza entre dos objetos inmóviles de masa m y M y 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 refleja en la conocida ley de Coulomb:

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

Como puede verse, las dos ecuaciones son análogas con la excepción de que en la segunda las cargas sustituyen a las masas. La analogía entre ambas es inequívoca, con la diferencia de que la ecuación gravitacional de Newton presenta un problema con respecto a la gravedad. Para ilustrar este problema,

supongamos que el Sol desapareciera de repente. Si esto ocurriese, pasarían ocho minutos hasta que notáramos el efecto en la Tierra, dado que la velocidad de la luz es finita, concretamente, en 3×10^8 m/s. Esta velocidad puede calcularse a partir de las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo; sin embargo, la analogía de Einstein que ligaba la gravedad y la electricidad no incorporaba las ecuaciones de Maxwell, solo las leyes de Newton y Coulomb. No se había hallado nada comparable a las ecuaciones de Maxwell para el fenómeno de la gravedad, y la ley de Newton, que se sabía válida para la gravedad, no predecía que esta última pudiera propagarse por el espacio. En su intento por descubrir cómo se propagaban a través del espacio los cambios de intensidad de la gravedad, Einstein recupera el mismo tipo de razonamiento que le permitió ligar la fórmula de la gravitación estática de Newton y la fórmula de la atracción eléctrica estática de Coulomb y así conciliar una teoría más general de la relatividad que desplazara analógicamente la gravedad y el electromagnetismo a dominios que incluyeran cuerpos que se mueven en relación a otros. Una de las consecuencias de este desplazamiento analógico –en este caso, vertical– era que la gravedad asumiría un comportamiento ondulatorio y se propagaría por el espacio a velocidad finita.

A la luz de los nuevos descubrimientos, Einstein comenzó a considerar, además de los marcos de referencia estáticos, aquellos en los que el observador se encuentra en reposo y aquellos en los que este se mueve a una velocidad constante, es decir, los marcos de referencia acelerados. Para ello, Einstein idea un nuevo experimento mental con el que confirmar teóricamente lo que poco después supuso una unificación cósmica. Este experimento consiste en imaginar un laboratorio con forma de cubo suspendido en el vacío del espacio con un reactor acoplado a una de sus seis paredes. Si el reactor comienza a acelerar de forma constante antes de que comience la ignición, todos los observadores situados dentro del laboratorio se encontrarán flotando en su interior. En el momento en que el reactor comience a impulsar el laboratorio, los observadores impactarán contra una de las seis paredes. La aceleración constante romperá la simetría e impedirá que los observadores permanezcan flotando en el interior. La

fuerza gravitatoria experimentada por parte de un observador situado en el interior del laboratorio responde a una fuerza ficticia –aunque para este fuera una fuerza tan real como la pared que considera el suelo o el techo del laboratorio, así como su singular orientación entre arriba y abajo–. En esta situación, el observador no es capaz de diferenciar la gravedad causada por el reactor de la experimentada por cualquier habitante de la Tierra. En otras palabras, el observador que se encuentra en el interior del laboratorio no puede estar seguro de si se encuentra acelerando de forma constante en el espacio vacío o si, por el contrario, el laboratorio aún se encuentra flotando en reposo. Este experimento mental llevó a Einstein a darse cuenta de que, al igual que un marco de referencia que acelera es fácilmente distinguible de un marco de referencia en reposo, un marco de referencia en aceleración es indistinguible de un marco de referencia en reposo inmerso en un campo gravitatorio. Einstein bautizó esta idea con el nombre de principio de equivalencia, una renovada interpretación de la relatividad fruto de una bella analogía que ligaba la gravedad y la aceleración.

La renovada visión de la relatividad de Einstein le impulsó a dar un paso más allá con su experimento mental. En esta ocasión, Einstein se imagina una linterna en posición horizontal paralela al suelo del laboratorio, arrastrado este por el reactor. Un observador situado en un marco de referencia exterior al laboratorio observaría que el rayo de luz se desplaza en una dirección fija respecto a las estrellas lejanas, mientras que la cabina lo hace a una velocidad cada vez mayor. Dada la aceleración constante, el observador situado en el interior del laboratorio percibirá una ínfima curvatura en el haz de luz en dirección al suelo –ínfima debido a la enorme diferencia que existe entre la velocidad de la luz y la del reactor–. De este modo, Einstein llega a la conclusión de que, si todo marco de referencia en reposo inmerso en un campo gravitatorio es indistinguible de otro que acelera, entonces cualquier fenómeno que pueda observarse dentro de la cabina –como la curvatura del haz de luz– puede ser observado en tierra firme. Dicho de otro modo, el principio de equivalencia, resultado de vincular analógicamente la aceleración y la gravedad, implica que si un haz de luz en una

cabina en aceleración en un espacio ingrávido sigue una curvatura, lo mismo debe ocurrir en la Tierra.

A raíz de las ideas propuestas por Einstein, en 1919, Arthur Eddington, durante el transcurso de un eclipse solar total, logró confirmar la curvatura de los haces de luz provenientes de una estrella distante debido al campo gravitatorio del Sol. Ante la verificación experimental por parte de Eddington, Einstein decide reexaminar una consecuencia sutil que emana de la formulación de su MRE: la contracción de longitud. Para ello, Einstein se propone resolver la paradoja de Ehrenfest. En su formulación original de 1909, Paul Ehrenfest analiza un disco rígido de radio R que gira con 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:

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

Sin embargo, 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 .

Para resolver esta paradoja, Einstein recurre a los estudios de geometría no euclídea desarrollados por Carl Friedrich Gauss y Bernhard Riemann durante el siglo XIX, un tipo de geometría donde la razón entre la circunferencia de un círculo y su diámetro puede diferir arbitrariamente de π . Al hacerlo, Einstein 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. Esto 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.

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

$$\begin{aligned}x_1 &= x \\x_2 &= y \\x_3 &= z \\x_4 &= \sqrt{-1}ct\end{aligned}$$

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, 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

$$x'_1{}^2 + x'_2{}^2 + x'_3{}^2 = x_1{}^2 + x_2{}^2 + x_3{}^2$$

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 las que Einstein construye su teoría de la relatividad –la analogía entre un campo gravitatorio y un marco de referencia acelerado; la analogía, desplegada en un nuevo dominio, entre las leyes de la mecánica y las leyes de la física en su conjunto; la analogía entre marcos de referencia en rotación y geometrías bidimensionales no euclidianas; así como la analogía entre geometrías no euclidianas en dos y en cuatro dimensiones– le proporcionaron las herramientas matemáticas necesarias para abordar su idea de la gravedad y cambiar 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 inconmensurable poder creativo de la metáfora reside en su capacidad para trasportar entidades sensibles o abstractas por la serena vehemencia de la imaginación. Este desplazamiento conceptual reside en su propia etimología, siendo la transferencia del significado que el término connota la que asume en última instancia naturaleza semántica. Asimismo, este proceso de transferencia en el significado es posible gracias a una bidimensionalidad en la naturaleza de esta estrategia de pensamiento, a saber: una dimensión epifórica y una diafórica. Analicemos ambas.

La dimensión epifórica (del griego ἐπιφορά, *epiphorá*) de la metáfora 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 misma, desvincula esta del terreno de la denominación y la conecta con el terreno de la predicación. En palabras del propio Henle: «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 denotado⁸⁴» (Henle 1958, pág. 83). Este desplazamiento del significado se ve complementado al mismo tiempo por su dimensión diafórica (del griego διαφορά, *diaphorâ*), vinculada con la creación de nuevos sentidos a través de 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. Pongamos 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 mecanismos combinatorios asumen nuevas relaciones semánticas. Esta conformación de un nuevo significado a partir de otro no se limita a un cambio de sentido en las palabras, sino que se amplía a cualquier signo.

En su *Poética*, Aristóteles define la metáfora del siguiente modo:

La metáfora consiste en dar a un objeto un nombre que pertenece a algún otro; la transferencia puede ser del género a la especie, de la especie al género, o de una especie a otra, o puede ser un problema de analogía (Aristóteles 2014, pág. 32).

⁸⁴ La traducción es mía.

Μεταφορά δὲ ἐστὶν ὀνόματος ἀλλοτρίου ἐπιφορά, ἢ ἀπὸ τοῦ γένους ἐπὶ εἶδος, ἢ ἀπὸ τοῦ εἶδους ἐπὶ τὸ γένος, ἢ ἀπὸ τοῦ εἶδους ἐπὶ εἶδος, ἢ κατὰ τὸ ἀνάλογον (Poet. XXI, 1457B, 6-9).

La sentencia del Estagirita dio paso a un sinfín de discusiones en torno a la relación entre el lenguaje considerado literal y el metafórico, una relación que se torna aún más problemática en algunos dominios especializados del lenguaje, como ocurre en el discurso científico. Si asumimos que la metáfora aparece cuando existe una interacción entre dos significados sobre los que se proyecta cierto grado de asociación, entonces resulta posible apelar a la metáfora como una estrategia clave en la investigación dada su capacidad de capturar paralelismos y regularidades procedentes de nuestra experiencia del mundo para configurar nuevos esquemas de conocimiento. De igual modo, si atendemos a su naturaleza bidimensional – epifórica y diafórica –, pensar acerca de la realidad supone siempre pensar desde una perspectiva – o lo que es lo mismo, desde un marco de referencia –. En este sentido, la realidad, entendida como el filtro de la propia experiencia, no puede ser tipificada, ya que hacerlo supondría limitarla conforme a una perspectiva, y todo cuanto admite una tipificación revela sus límites ontológicos.

Antes de analizar el papel que la metáfora asume en ciencia, considero importante rescatar el concepto acuñado por Koestler de bisociación – *bisociation* – (Palma 2005), el cual alude a la intersección de dos planos asociativos o universos del discurso que, en un sentido ordinario, se perciben como separados y, en ocasiones, hasta incompatibles. La metáfora permite capturar la convergencia de ambos universos dando como resultado un cambio en la percepción de los hechos, organizándose conforme a una nueva lógica y produciendo resultados nuevos y sorprendentes. Esta nueva percepción no se limita solo a ofrecer un nuevo cambio de perspectiva, sino que permite una nueva reorganización de los contenidos empíricos. En palabras del propio Koestler: «La bisociación repentina de un evento mental con dos matrices habitualmente incompatibles resulta en una transferencia abrupta del tren de pensamiento de

un contexto asociativo a otro⁸⁵» (Koestler 1964, pág. 59). Y, más adelante concluye: «Esta bisociación de la experiencia subjetiva con un marco de referencia objetivo es quizá el descubrimiento más ingenioso del Homo sapiens⁸⁶» (*Op. cit.*, pág. 63).

La idea de que la metáfora introduce un cambio lingüístico en la denominación sembró la semilla de la discordia acerca de si esta se muestra como una estrategia fiable con la que acometer objetivamente el estudio del mundo. Tal y como hemos visto en el capítulo anterior, la ciencia progresa mediante la configuración de modelos que permiten, por un lado, la descripción cuantitativa del mundo y, por otro, la intervención en este a través del cálculo y la predicción. Es precisamente aquí, en la fase de observación previa a la de modelización, donde la metáfora desempeña un papel crucial al permitir proyectar a lo ignoto la experiencia de lo ya conocido, dotando de estructura inferencial un nuevo dominio y revelando, al mismo tiempo, la homogeneidad oculta de la realidad.

4.1. El valor gnoseológico de la metáfora

El creciente interés que ha despertado la metáfora en el terreno de la ciencia ha llevado a muchos autores a cuestionar su potencial gnoseológico. Según la herencia tradicional, la metáfora ha sido considerada patrimonio casi exclusivo del lenguaje literario; no obstante, su naturaleza cognoscitiva le otorga un espacio de creciente interés dentro del ámbito de la epistemología, ya que su revalorización dentro del discurso científico no obedece a criterios discursivos, sino a su capacidad para dotar de estructura inferencial realidades nuevas a través del lenguaje.

A continuación, analizaré el valor gnoseológico que la metáfora asume en su incorporación al discurso científico. La premisa en torno a la cual se desarrollarán los subsiguientes apartados asume que todo lenguaje —incluido el lenguaje

⁸⁵ La traducción es mía.

⁸⁶ La traducción es mía.

matemático— es, en esencia, tropológico, lo que convierte a la metáfora en el principal motor de su actividad lingüística, así como de su naturaleza simbólica.

4.1.1. El valor heurístico de la metáfora

El poder evocativo de la metáfora permite recrear la realidad a partir de nuevos dominios de conocimiento. En lo que respecta a su valor heurístico (del griego εὐρίσκειν, “hallar, inventar”), este se encuentra ligado a su dimensión creativa. Esta dimensión creativa alcanza su máxima expresión en el discurso científico, donde la metáfora facilita la configuración de modelos a través de la puesta en interacción de diferentes dominios a partir de una serie de rasgos comúnmente asociados. Como resultado, podemos considerar algunas nociones cuyo origen responde a un germen metafórico, como es el caso de fluido electromagnético, donde se alude al flujo de un líquido que discurre por una conducción; línea de corriente, donde se apela a la imagen visual de la trayectoria que siguen las partículas; cuerda elástica, un objeto material distinto a una partícula con el que interpretar los resultados cuantitativos; o función armónica, noción tomada del ámbito de la matemática. En todos estos casos, la metáfora proporciona un soporte estructural que facilita el discurso de la razón al descansar sobre imágenes que en ningún caso constituyen una imagen fidedigna de la parcela de realidad estudiada.

- 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

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 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 la metáfora: *La Tierra es una nave*, 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 ligados a nuestro modo particular de ver e 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

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 catacresis (del griego κατάχρησις, “abusión”) como un recurso retórico que permite trasponer metafóricamente un término de nuestro lexicón 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 catacresis.

La facultad cognitiva de nuestra especie, así como el alcance referencial del lenguaje natural humano, permite postular la existencia de entidades y fenómenos que escapan al dominio de la observación directa. Esto nos confiere la capacidad de acuñar nuevos términos gracias a mecanismos analógicos basados en el razonamiento y la verbalización, proporcionando nuevos marcos teóricos donde la postulación de nuevas nociones no ve mermado su rigor intelectual —enana blanca, energía/materia oscura o gigante roja—. Sin embargo, esta prestación terminológica 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 una entidad o 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 inevitable ejercicio de racionalidad conduce a la inevitable formación de nuevos conceptos. Como ejemplo de este proceso de catacresis, podemos apelar al término agujero negro. Este vocablo se inscribe en el lenguaje con el sustantivo agujero, una especie de abertura en el tejido espacio-tiempo, y el adjetivo negro, inobservable debido a la inexistencia de luz. Este término es un

ejemplo triunfante de cómo la metaforización permite abrir nuevas ventanas al mundo real⁸⁷.

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 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 este tipo de catacresis también ha planteado problemas tangenciales dentro del ámbito de la ciencia, como el hecho de si las teorías científicas se encuentran constituidas por términos de carácter metafórico. También, y no menos importante, sería interesante estudiar si la elección de un término en vez de otro obedece 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 selección de un término prefijado dentro del esquema lingüístico general de una comunidad para someterlo a un proceso de remodelación en su significado y rellenar así dicho vacío tendría que llevar consigo un ejercicio analógico de fondo. Esto vuelve a plantear serias dudas acerca de si es legítimo o no la inclusión de términos viejos para referir realidades nuevas, ya que estos términos deben ajustarse a un marco inteligible aprobado intersubjetivamente por la propia comunidad científica.

⁸⁷ Además de la catacresis, 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.).

El gran número de catacresis presentes en el ámbito de la ciencia se debe, en primer lugar, a nuestra incapacidad para abarcar lingüísticamente todo el conocimiento que poseemos del mundo y, en segundo, a una terminología limitada en nuestro lexicón mental con la que categorizamos y designamos cada aspecto concreto del universo que habitamos. La necesidad de designar una nueva realidad impulsa la acuñación de un nuevo concepto gracias a la prestación de un término presente en el marco lingüístico del cual inferimos un cierto grado de asociación. De igual modo, la elección de un término provisto de significado, aceptado y compartido intersubjetivamente por todos los miembros de una misma comunidad para dar forma a un nuevo dominio de conocimiento muestra un primer ejercicio de interacción con esa nueva realidad, ya que la elección está, en gran parte, sujeta a cómo nos aproximamos y deseamos estudiar ese nuevo campo de experiencia.

En suma, el valor catacrético de la metáfora permite conjeturar la naturaleza del impulso primigenio que conduce a la aplicación creativa de los nombres para apropiarse conceptualmente de nuevas realidades, permitiendo establecer un marco conceptual coherente dentro del cual una realidad se torna manifiestamente comprensible gracias a una aproximación metafórica del fenómeno.

4.1.3. El valor exegético de la metáfora

En ciencia, el lenguaje matemático se muestra decisivo en la captación y descripción cuantitativa de los comportamientos y regularidades del mundo físico. La simbología matemática que permite la formalización teórica depende estrechamente de un ejercicio en paralelo de experimentación que no sería posible sin un enorme esfuerzo creativo. Esta doble actividad presente en el método científico conduce a la formulación de modelos y teorías que pueden definirse como construcciones metafóricas de la realidad. En palabras de 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 humanas⁸⁸ (Lakoff & Núñez 2000, pág. XI).

La matemática constituye, por tanto, el esquema operatorio de la ciencia moderna. Así lo suscriben ambos autores más adelante:

Es preciso, consistente, estable en el tiempo y en las comunidades humanas, simbolizable, calculable, generalizable, universalmente disponible, coherente dentro de cada una de sus materias, y eficaz como una herramienta general de descripción, explicación y predicción en una gran cantidad de actividades cotidianas, desde deportes, construcción, tecnología y ciencia⁸⁹ (*Op. cit.*, pág. 377).

La premisa de la que parten Lakoff y Núñez se asienta en la idea de que los resultados aportados por el análisis matemático deben entenderse en términos cognitivos, ya que todo análisis matemático remite a un ejercicio metafórico de origen. Ambos autores, al igual que Pinker, argumentan que las metáforas conceptuales –*conceptual metaphors*– y la integración conceptual –*conceptual blending*– funcionan como los principales mecanismos cognitivos con los que concebir las entidades matemáticas, ya que ambos constituyen «un mecanismo neural que nos permite usar la estructura inferencial de un dominio conceptual para razonar sobre otro⁹⁰» (*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

⁸⁸ La traducción es mía.

⁸⁹ La traducción es mía.

⁹⁰ La traducción es mía.

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*]⁹¹ (*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 ($a: B \subseteq A, b: A \cup B, c: A \cap B$), 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).

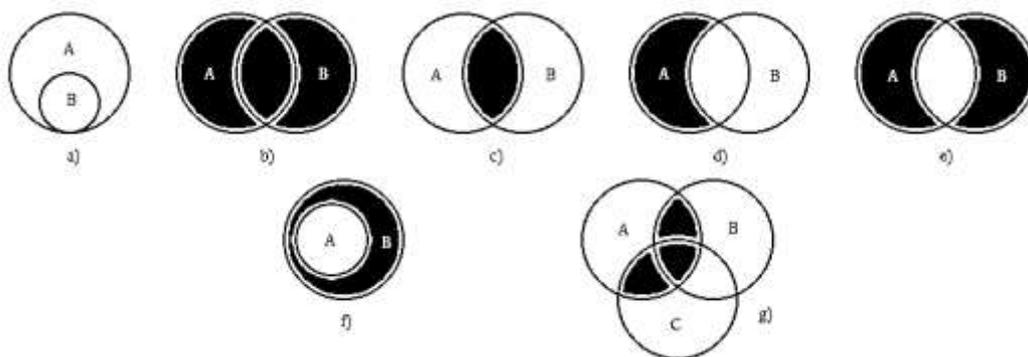


Fig. 1.

Los diagramas de Venn permiten la conceptualización metafórica de la lógica booleana en términos de estructuras contenidas, tornando primaria la lógica

⁹¹ La traducción es mía.

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 las observaciones experimentales a un plano simbólico. Este ejercicio inherente a la propia actividad científica comienza con una primera fase de acercamiento intuitivo que surge ante un impulso de estructurar cuantitativamente el mundo. La formalización cuantitativa requiere, en primer lugar, ser sometida a un ejercicio de abstracción conceptual sobre magnitudes medibles (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 a este expresar una relación cuantitativa entre una formalización abstracta y las regularidades y patrones de comportamientos del fenómeno estudiado.

Etimológicamente, el término exégesis involucra una comprensión crítica de un texto. En ciencia, el lenguaje simbólico de la matemática permite capturar conceptualmente un dominio de experiencia desde una representación abstracta. El potencial exegético del pensamiento metafórico permite aplicar nuestro aparato cognitivo sobre un lenguaje cualitativamente ininteligible en el que la metáfora, al operar mediante la evocación de una imagen asociada, conecta el lenguaje formalizado con una comprensión racional del mundo, validando la interpretación sensible de los hallazgos metodológicos y haciéndolos intersubjetivamente comunicables, adquiriendo así validez universal.

El método científico se ha consagrado, sin duda alguna, como el procedimiento más fiable para acometer el estudio del mundo físico; sin embargo, la ciencia va más allá del mero hecho de ser un conjunto de procedimientos metodológicos, ya que implica una serie de fundamentos epistemológicos que orientan y vertebran todo el conjunto de operaciones fijadas previamente por el investigador. Toda elucidación científica resultante de un proceso sistemático de

formalización culmina en una colección de datos cuantitativos, pero no alcanza ninguna significación hasta que dichos datos no se someten a un proceso de interpretación cualitativa. El valor exegético de la metáfora permite esta interpretación, volviendo cognoscibles realidades nuevas a partir del lenguaje simbólico de la matemática.

4.2. Grandes metáforas en la historia de la ciencia

La presencia de metáforas en nuestro modo de pensar sobre el mundo puede rastrearse hasta la más remota antigüedad, durante los primeros años de vida de nuestra especie. En una época anterior en la que caprichosas agrupaciones estelares cautivaban la imaginación de nuestros antepasados mostrando trágicas batallas entre héroes y bestias, la facultad de fabular e inventar historias permitió construir una imagen del mundo en el que dispersos puntos de luz se convertían en referentes metafóricos al cobrar validez explicativa durante la contemplación del cielo nocturno. Del propósito de entender el mundo y de establecer con él un diálogo surgieron las primeras grandes conceptualizaciones teóricas, asentadas estas en bellas metáforas que nuestros antepasados impusieron al mundo circundante. El universo percibido como un organismo vivo, como una gran maquinaria o como un libro escrito en lenguaje matemático son algunas de las máscaras metafóricas que nuestra especie ha configurado a lo largo de la historia para representar simbólicamente la realidad y trascender así su mera contemplación estética.

Durante siglos, la metáfora ha actuado como filtro de la percepción por parte de diferentes culturas y sociedades, encarnando el poder propio del ingenio humano y redefiniéndose según la experiencia disponible. La creatividad de nuestra especie ligada a una interpretación metafórica del mundo dio paso a que muchas metáforas se consolidaran como verdaderos supuestos metafísicos de la naturaleza, delimitando el campo de experiencia sobre el que actuaba el conocimiento y la acción humana. A continuación, analizaré algunas de las grandes metáforas que nuestra especie se ha valido a lo largo de su historia para

interpretar y representar la realidad, así como su enclave decisivo en el discurso filosófico como fuente de inspiración para la reflexión y el estudio del mundo empírico.

4.2.1. 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. Ante este irrefrenable deseo de capturar lingüísticamente la realidad en su plena esencia, los griegos bautizaron al 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 de la *phýsis* 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 hombre⁹²» (Aristóteles 1995, pág. 10).

Como matización terminológica, 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 *phý-sis* evocaba en la Antigua Grecia el proceso una vez completado de un devenir, del destino físico de algo con todas y cada

⁹² De ahí que la expresión *physei ónta* (del griego τα φύσει ὄντα, “entidades naturales”) buscara capturar lingüísticamente los distintos modos en que puede ser, existir o producirse una entidad en el mundo, en contraposición a *techné onta* (del griego τα τέχνη ὄντα, “entidades artificiales”), creadas estas a partir de la planificación y la acción humana.

una de sus propiedades (Naddaf 2005). Veamos como ejemplo la referencia más antigua que se conserva del término.

En la *Odisea*, Homero hace uso de la *phýsis* por vez primera atribuyéndole un matiz conceptual levemente distinto al que le otorgaron sus sucesores griegos: «Tal diciendo, el divino Argifonte entrégome *una hierba que del suelo arrancó y, a la vez, me enseñó a distinguirla* [καὶ μοι φύσιν αὐτοῦ ἔδειξε]; 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 su primera aparición, 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 diosa⁹³. El mismo significado que abraza la *phýsis* en la *Odisea* es recuperado años más tarde por Heráclito (ca. 535 – 484 a.C.): «*La phýsis anhela ocultarse* [φύσις κρύπτεσθαι φιλεῖ]» (DK22B123).

Ahora bien, ¿existe alguna relación entre la etimología homérica del término y el modo en que este fue empleado por los pensadores presocráticos? Existe, si bien es cierto, una continuidad semántica y, por consiguiente, metafórica en el uso del mismo. En relación a la referencia que la *phýsis* adquiere en la *Odisea*, el mismo Heráclito afirma que, aunque los hombres no comprendan aquello que revelan sus palabras, aun así, se precian en «*distinguir cada cosa según sea su naturaleza* [κατὰ φύσιν διαίρέων ἕκαστον καὶ φράζων ὅπως ἔχει]» (DK22B1). La sentencia de Heráclito atribuye 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).

⁹³ 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).

4.2.1.1. *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* [φύσιν] 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* [φασίν] 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). Una 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*⁹⁴, Parménides (*ca.* 515 a.C.) ofreció una narración metafórica sobre el

⁹⁴ En el marco de la filosofía presocrática, muchas de las obras circulaban bajo el título: *Peri physeōs* (del griego Περὶ 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.).

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 homónima⁹⁵, 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 mundo⁹⁶.

Al igual que Parménides y Anaximandro, Eurípides (ca. 480-406 a.C.) resaltó 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* [φύσις] es inmortal, de donde todo converge y emerge. Hombres tales no albergan apego a acciones indignas⁹⁷» (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

⁹⁵ 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 aquellos citados en el siglo VI por Simplicio al glosar un texto de Teofrasto.

⁹⁶ Los *Peri physeōs* son un conjunto de obras didácticas de la Grecia Clásica 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 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).

⁹⁷ En griego antiguo, el término κόσμον se traduce como “mundo” y ἀγήρω como “eterno”, el cual es genitivo. El uso de tales epítetos era común entre los fisiólogos [φυσιολόγοι] griegos, ya que para ellos el cosmos era algo dinámico. En la sentencia de Eurípides, la traducción literal debe ser tomada en sentido perifrástico, “lo que por naturaleza es inmortal”, en contraposición a la promulgada de Sófocles: «Lo que por naturaleza es mortal [θνητή φύσις]».

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 lo 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 [φύσις]» (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 ámbito de la medicina, concretamente en el *Corpus hippocraticum* asociado a Hipócrates (ca. 460-370): «[El médico debe] conocer la *phýsis* [φύσιν] del hombre». La sentencia de Hipócrates vinculó 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 ἰατρική, *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 del hombre, y, por otro, construir una imagen coherente de los fenómenos naturales y acometer su estudio a partir de la investigación empírica⁹⁸.

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 espermatozoide 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. En palabras de Lonie: «Si revisas todo cuanto he dicho hasta ahora, encontrarás que el proceso de crecimiento en plantas y en humanos es, de principio a fin exactamente el mismo» (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 cómo llegó a ser. Esto, a su vez, explica la observación pertinente de Aristóteles con respecto a sus predecesores: «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*.

⁹⁸ Esto explica por qué para los primeros fisiólogos [φυσιολόγοι] presocráticos, la *phýsis* conceptualizaba esa fuerza primigenia que se manifestaba tanto en el ser humano como en todos y cada uno de los fenómenos de la naturaleza.

La máscara metafórica de 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 la *phýsis* asume una significación similar:

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

Coro: ¿Qué significa esto?

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

La metáfora orgánica de la religión homérica sembró la semilla de la reflexión sobre la *phýsis* a partir de una nueva manera de percibir el mundo, originado este en un proceso dinámico y divino. La *phýsis*, como fuerza primera que vertebró tanto el orden cósmico como la propia naturaleza humana, promovió la apertura de la razón a partir de una máscara metafórica que explicaba el mundo como resultado de un proceso originado a partir de un estado primigenio. Esta ruptura conceptual se hace visible 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.

4.2.1.2. *La phýsis como fin*

Cercana a la significación de la *phýsis* como origen, se encuentra la utilización que, según los escritos legados por Diógenes Laercio, emplea del término Filolao (ca. 470 a.C.), para quien la *phýsis* es a su vez sinónimo de orden

cósmico. Aristóteles, por su parte, en su *Metafísica*, 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).

Para Aristóteles, la *phýsis* responde a aquello que existe conforme a un fin, por lo que el término sugiere una implicación teleológica que redefine el concepto como el conjunto de causas que operan en atención a algo (Russell 1997). En palabras de Nisbet:

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).

En este sentido, la *phýsis* alude a la interpretación del principio intrínseco de todo movimiento aplicado a un ente natural. En primer lugar, la *phýsis* obedece a la esencia del movimiento, y, en segundo lugar, al efecto del mismo. Así lo expresa el propio Aristóteles: «La naturaleza [φύσεως] 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). Ambas significaciones permanecen, por tanto, entrelazadas bajo un vínculo de mutua inmanencia, facilitando una imagen unificada del cosmos que culmina en 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 jerárquico⁹⁹, 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 a la *phýsis*, pues cada entidad no solo ocupa un lugar específico según su jerarquía natural, sino que cada una de estas tiende además 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 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

⁹⁹ 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.

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*, el Estagirita 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 esta¹⁰⁰. 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, al igual que ocurre con el resto de entidades sublunares, para Aristóteles, la sociedad se encuentra sometida a un proceso de continuidad y evolución hasta alcanzar un estado perfecto o *polis*. La agrupación jerárquica de la sociedad griega, por tanto, no debe regirse por un criterio de voluntad racional según el consentimiento de

¹⁰⁰ La concepción esférica del cosmos aristotélico es herencia del pensamiento platónico acerca de que 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).

los ciudadanos, sino que debe obedecer a causas naturales¹⁰¹, 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* [φύσει] y un señor natural, y el que puede con su cuerpo realizar estas cosas es súbdito y esclavo *por naturaleza* [φύσει]; 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* [φύσει], y que el hombre es por naturaleza un *animal social* [πολιτικὸν ζῷον]¹⁰²» (*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) marcada por el carácter teleológico que revela la *phýsis* del hombre. Al igual que el cambio de la organización familiar a la *polis* viene regido por un

¹⁰¹ 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.

¹⁰² 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 πολιτικὸν, “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.

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).

De ser así, 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. Es más, el carácter teleológico de la *phýsis* aristotélica permite, al mismo tiempo, establecer una serie de analogías entre el modo en que emergen y evolucionan las entidades naturales y el orden moral de una sociedad, ya 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*: «Si uno observa desde su origen la *evolución* [φωόμενα] de las cosas, también en esta cuestión, como en las demás, podrá obtener la visión más perfecta» (Aristóteles 1988, pág. 46). En este sentido, la *polis*, al igual que el cosmos en su totalidad, ha de ser organizarse atendiendo a su ordenamiento natural.

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
(*Op. cit.*, págs. 49-50).

Pese a todo, conviene matizar que Aristóteles emplea el término *phýsis* en sentido literal para su filosofía del estado. El verdadero empeño del Estagirita se basa en hacer de la urdimbre heurística de la *phýsis* una estrategia metodológica que explique las causas del cambio de las estructuras sociales no 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.

4.2.1.3. *La phýsis como cambio cíclico*

Cuando Perséfone, hija de Deméter, diosa de la vida y la regeneración, fue raptada por Hades, Deméter, desconsolada, descuidó la tierra provocando malas cosechas. Consternado, Zeus, en socorro del hombre, exigió a Hades que liberara a Perséfone. Hades, obligado a obedecer, dio 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, simboliza el destino del hombre al mismo tiempo que prescribe los principios teóricos de la cosmovisión griega. El mito de Deméter redefine la *phýsis* como poder generativo de la naturaleza. Esta nueva dimensión significativa de la *phýsis* como cambio cíclico que cobra sentido en la percepción de la salida y puesta del Sol, del día y la noche, de la llegada de las estaciones, se encuentra ya descrita en el diálogo platónico *Político*:

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* [ζῷον] y ha recibido desde el comienzo una *inteligencia* [συναρμύσαντος] que le fuera concedida por aquel que lo compuso¹⁰³ (Platón 1988, pág. 527).

No cabe duda de que esta nueva significación de la *phýsis* como cambio cíclico se entrega a un gran número de reflexiones en cuanto al comportamiento tanto del cosmos como de la actividad humana. Por su parte, Aristóteles, no menos convencido de la naturaleza cíclica que presentaba el mundo, 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 trasciende el mundo físico y 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

¹⁰³ Es preciso matizar que, en su versión original, el término συναρμύσαντος refiere a un principio de autonomía propio de los organismos vivos, lo que inscribe en la *phýsis* el carácter de vida y movimiento. Así, ζῷον no alude a un mero cuerpo puesto en movimiento por una entidad sobrenatural que actúa como demiurgo de la creación, sino que muestra una criatura dotada de vida, un cuerpo animado cuya *phýsis* le permite el movimiento. Por tanto, el cosmos, como ζῷον, está sujeto al cambio, a la corruptibilidad y, posteriormente, a la decadencia, pero recuperando la vida y recibiendo de su artífice una inmortalidad renovada.

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 peligrosa¹⁰⁴» (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* y el *lógos*, creando un campo de proyección de la propia experiencia que llevaba implícita la más tácita expresión humana.

4.2.2. 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 que tuvieron lugar en el terreno de la ciencia durante los siglos XVI y XVII. En términos históricos, la revolución científica nace en 1543 con la aparición de *De revolutionibus orbium*

¹⁰⁴ La traducción es mía.

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 contrapuesto a los valores heredados de la Edad Media¹⁰⁵, un cambio de perspectiva que por vez primera interpretaba el universo bajo la metáfora de la máquina.

La renovada visión que asumió la filosofía mecanicista se fundamentaba en la descripción de entidades y fenómenos naturales a partir de nociones más simples como la materia y el movimiento. 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 máquina; la segunda, la aceptación 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 estudios científicos llevados a cabo 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

¹⁰⁵ 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).

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.

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. La metáfora del universo como una gran maquinaria trasciende, por tanto, la mera analogía explicativa y 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, esta 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.

4.2.2.1. *La metáfora de la máquina*

La metáfora de la máquina 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. Tanto a nivel ontológico –analogías estructurales– como a nivel de movimiento –analogías relacionales–, la metáfora mecanicista puso en interacción una serie 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 el que este se rige, consolidan la raíz epistemológica de la metáfora de la máquina. Analicemos cada una de estas fuentes por separado.

4.2.2.1.1. *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 el mecanicismo 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 paradigma mecanicista 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.

Desde un punto de vista epistemológico, 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

corpúsculos 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.

4.2.2.1.2. *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 entidad desde la proximidad o lejanía de una o más entidades consideradas en reposo hasta otra entidad o grupo de entidades consideradas también en reposo frente a la primera, hace del mismo algo 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, una misma entidad puede estar moviéndose respecto de un sistema de referencia e inmóvil o en reposo respecto de otro¹⁰⁶. Al mismo tiempo, estas las leyes que rigen el movimiento corpuscular se piensan como homogéneas, lo que significa que existe una identidad entre el mismo conjunto de leyes que rige el movimiento de los cuerpos en el dominio de la macrofísica como en el comportamiento de las unidades últimas de la materia, es decir, en el mundo de la microfísica. 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.

¹⁰⁶ 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).

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 permiten 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 para la cognición humana.

La metáfora mecanicista permite la configuración de una imagen conceptual conforme a una perspectiva. Al percibir el mundo como una gran maquinaria en la que, una vez conocidas las condiciones iniciales de un sistema, resulta posible predecir su comportamiento a partir de una serie de leyes. La precisión del lenguaje matemático a la hora de dar cuenta de estas leyes ligado a la facultad cognitiva de nuestra especie de configurar *a priori* una imagen del mundo, dotó al hombre de una herramienta cognitiva crucial que siglos después le permitió poner el pie en la luna: el cálculo. Con el cálculo, las premisas científicas adquirieron naturaleza predictiva. Una de las características de las leyes asumidas por la filosofía mecanicista consistía en que toda acción entre corpúsculos materiales se produce por medio del contacto directo entre ellos (véase *Fig. 2*¹⁰⁷).

¹⁰⁷ Tras el choque entre ambos corpúsculos —blanco y negro—, las direcciones de sus velocidades cambian —en este caso, formando un ángulo de 90°— tras la colisión, de modo que el cambio en algunas de sus características medibles (dirección, velocidad, etc.) solo resulta posible dado el contacto entre ambas partículas corpusculares. Esta visión mecanicista del mundo se aproxima al ideal euclídeo de sistematización deductiva, según el cual, a partir de un conjunto de axiomas válidos, se pueden demostrar teoremas válidos.

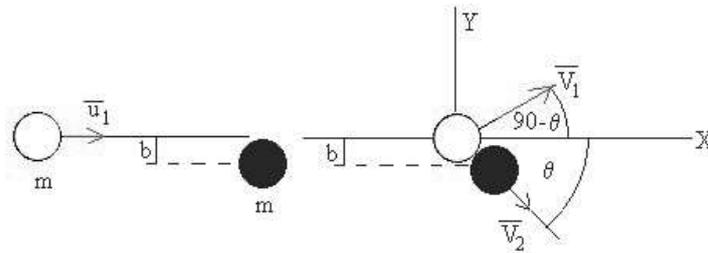


Fig. 2.

Desde un punto de vista metodológico, la formalización matemática de las leyes naturales incorporó la descripción cuantitativa del comportamiento de estas unidades corpusculares últimas que constituyen la materia. La implementación matemática facilitó además la incorporación de nuevo repertorio de conceptos que permitió que categorías primarias como el tamaño y el movimiento se volvieran susceptibles de describirse simbólicamente. En el caso del tamaño y la forma, ambas categorías respondían a cualidades geométricas; y en el caso del movimiento, este se percibía como la traslación de un lugar a otro de estos corpúsculos últimos que dan forma a la materia, algo susceptible de cuantificar a través de magnitudes espaciales. Asimismo, categorías temporales, como el tiempo, facilitaron la conceptualización matemática a partir de una línea recta ilimitada en la que, desde un punto que sitúa el presente, cada uno de los largos representa el pasado y el futuro.

El mecanicismo se valió de la distinción entre cualidades primarias y secundarias para llevar a cabo una descripción cuantitativa de un mundo desprovisto de aspectos cualitativos. Como ejemplo de ello, hagamos uso, una vez más, de nuestra metáfora paradigmática: *El átomo es un sistema solar en miniatura*. A nivel estructural, en el caso del dominio fuente —el sistema solar—, el Sol posee un conjunto de propiedades (un diámetro, una superficie, un volumen, etc.) que permiten proyectar un conjunto de correlaciones parciales al dominio meta —el átomo—. A nivel relacional, algunas de las propiedades orbitales que presentan los planetas con respecto al Sol (el desplazamiento orbital alrededor de este, su situación en el centro como punto de masa, etc.) se proyectan de forma análoga al comportamiento del núcleo atómico. Todas estas propiedades se convierten en

analogías estructurales y relacionales que vinculan dos dominios de experiencia —el átomo y el sistema solar— a partir la idea de que los fenómenos físicos son susceptibles de ser descritos a partir de un modelo mecánico que facilite la descripción de un nuevo dominio a partir de la proyección de una serie de descripciones parciales.

Otra de las consecuencias del pensamiento mecanicista reside en su carácter determinista, según el cual el estado del mundo en un momento dado es 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, afirmando que todos y cada uno de los fenómenos físicos obedecen a comportamientos mecánicos de la materia susceptibles de describirse a partir de las leyes del movimiento.

4.2.2.1.3. *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 este. Esta descripción del movimiento de los cuerpos se vio desarrollada posteriormente por las aportaciones de Kepler al introducir la elipse y la parábola como tipos de movimiento presentes en los fenómeno físico.

Descartes, en su *Geometría*, ofreció un método para la resolución de determinados problemas geométricos presentando el álgebra como método resolutivo en esta ciencia. Así pues, Descartes, interesado en proponer una doctrina filosófica alternativa a la física aristotélica, desarrolló 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 entidades y fenómenos supuestos en estrecha analogía con el funcionamiento de una máquina. En *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 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).

Descartes apela a estos tres elementos con idea de señalar la existencia de tres tipos diferentes de corpúsculos materiales que, a su vez, componen el resto de entidades físicas. Al mismo tiempo, Descartes 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, y según las leyes cartesianas, no es el movimiento de un corpúsculo el que necesita explicación, sino el reposo del mismo.

Cuando un cuerpo se mueve, aunque su movimiento se haga con frecuencia en línea curva y aunque no pueda efectuarse ninguno que no sea circular en cierto sentido [...], cada una de sus partes en particular tiende siempre a proseguir el suyo en línea recta. De este modo su acción –es decir, la inclinación que las partes tienen a moverse– es distinta de su movimiento (*Op. cit.*, pág. 123).

Descartes ilustra su tercera ley del movimiento a través del siguiente ejemplo:

Si se hace girar una rueda sobre su eje, aunque todas sus partes den vueltas –pues estando unidas una a otra no podrían girar de otro modo–, su inclinación es, sin embargo, a desplazarse rectilíneamente, tal como se muestra claramente si por azar alguna se separa de las otras: tan pronto como está en libertad, su movimiento cesa de ser circular y prosigue en línea recta (*Op. cit.*, pág. 123).

A partir del movimiento de los corpúsculos, 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 extensión¹⁰⁸.

Tras postular la extensión como propiedad inherente a toda entidad material, Descartes proyecta una serie de analogías mecanicistas al universo en su

¹⁰⁸ 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.

totalidad, considerando este como una gran maquinaria que opera de acuerdo a las leyes de Dios: «Hasta ahora sólo he descrito esta Tierra y en general todo el mundo visible, tal y como si solamente fuese una maquina en la que nada hubiese que considerar sino las figuras y los movimientos de sus partes» (Descartes 2002, pág. 392). Para Descartes, Dios es garantía de la metáfora que considera el universo como una máquina que opera de acuerdo a una serie de reglas impuestas en el momento de la creación. El problema que presenta este planteamiento reside en suponer que las leyes naturales que rigen el mundo físico dependen de una voluntad divina. Con su tercera ley del movimiento, Descartes postula que «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). En el caso de dos cuerpos, uno en movimiento y otro en reposo, según esta ley, 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.

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 entidades físicas extensas. En palabras de Descartes:

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 Galileo decide introducir la idea de que el estado sólido que presenta 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, Galileo se valió de planos inclinados y dos esferas de distinto peso para estudiar en detalle el comportamiento de estas sobre los planos y verificar que, a pesar de la diferencia en el peso de ambas esferas, su comportamiento sobre los planos sería el mismo¹⁰⁹. Cito a Galileo:

Reflexionando sobre los problemas del movimiento, para los cuales, y a fin de demostrar los accidentes por mí observados, me faltaba un principio totalmente indudable que pudiera poner como axioma, he llegado a una proposición que tiene mucho de natural y evidente; y, supuesta ésta, demuestro luego todo el resto, en especial que los espacios atravesados por el movimiento natural están en proporción doble del tiempo y que, por consiguiente, los espacios atravesados en tiempos iguales son como los números impares "*ab unitate*" y las otras cosas. Y el principio es el siguiente: Que el móvil natural va aumentando de velocidad en la misma proporción en que se aleja de su punto de partida;

¹⁰⁹ 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 experimentación y la matematización de un fenómeno eran necesarias para dar cuenta de la validez de una idea o teoría.

por ejemplo, si un grave cae del punto a por la línea $abcd$, supongo que el grado de velocidad que tiene en c es al grado de velocidad que tenía en b como la distancia ca es a la distancia ba y así, por consiguiente, tendrá en d un grado de velocidad mayor que en c en la medida en que la distancia da es mayor que la distancia ca (Galileo, cit. Koyré 1980, pág. 76).

La reflexión de Galileo acerca del movimiento de caída de los cuerpos asume proporcionalidad entre la velocidad y el espacio. Así lo expresa el propio Galileo:

Supongamos que la línea ak hace un ángulo cualquiera con la línea af , y que por los puntos c, d, e, f se trazan las paralelas cg, dh, ei, fk . Puesto que las líneas fk, ei, dh, cg son entre sí como las líneas fa, ea, da, ca [...] las velocidades en los puntos f, e, d, c , son, por lo tanto [...] como las líneas fk, ei, dh, cg . Los grados de velocidad aumentan, pues, en todos los puntos de la línea af , según aumentan las paralelas trazadas en estos puntos. Por otra parte, puesto que la velocidad a la que el móvil ha pasado de a a d está compuesta por todos los grados de velocidad que ha adquirido en todos los puntos de la línea ad , y puesto que la velocidad con la que ha atravesado la línea ac está compuesta por todos los grados de velocidad que ha adquirido en todos los puntos de la línea ac , se deduce que la velocidad con la que ha atravesado la línea ad es a la velocidad con la que ha atravesado la línea ac lo que todas las líneas paralelas trazadas por todos los puntos de la línea ad hasta ah son a todas las paralelas trazadas desde la línea ac hasta la línea ag ; y esta proporción es la del triángulo adh al triángulo acg , es decir la del cuadrado de ad al cuadrado de ac ; de este modo, la velocidad con la que se ha atravesado la línea ad guarda con la velocidad con que se ha atravesado la línea ac una proporción doble de la que tiene ad respecto a ac . Y puesto que la relación de la velocidad con la velocidad está en proporción inversa de la que guarda el tiempo con el tiempo [...], se sigue que el tiempo del movimiento en ad guarda con relación al tiempo del movimiento en ac una proporción subduple de la que tiene la distancia ad con respecto a la distancia ac . Las distancias al punto de partida son, pues, como los cuadrados de los tiempos, y, por consiguiente, los espacios atravesados

en tiempos iguales son entre sí como los números impares *ab unitate*; lo que corresponde a lo que siempre he dicho, y a las experiencias observadas. Y, así pues, todos los hechos concuerdan. Y si estas cosas son ciertas, demuestro que la velocidad, en el movimiento violento, decrece en la misma proporción con que crece la velocidad en el movimiento natural a lo largo de la misma línea recta (*Op. cit.*, págs. 95-96).

Para Galileo, la velocidad de un cuerpo en cualquier punto del recorrido debe obedecer a la suma de las velocidades instantáneas adquiridas hasta ese movimiento uniformemente acelerado:

Supongamos que el flujo del tiempo, a partir de un instante cualquiera *A*, está representado por la extensión *AB*, de la cual se toman dos tiempos cualesquiera *AD* y *BE*; que *HI* es la línea por la que el móvil, a partir del punto *H*, tomado como comienzo del movimiento, desciende con un movimiento uniformemente acelerado; *HL*, el espacio atravesado en el primer tiempo *AD* y *HM* el espacio por el cual descenderá en el tiempo *AE*; afirmo que el espacio *HL* al espacio *HM* tiene proporción doble de la que poseerán los cuadrados *EA*, *AD*. Si se traza la línea *AC* formando un ángulo cualquiera con *AB*, y de los puntos *D*, *E* las paralelas *DO*, *EP*: de éstas, *DO* representará el grado máximo de velocidad alcanzado en el instante *E* del tiempo *BE*. Pues bien [...], en lo que concierne a los espacios recorridos, que los espacios, uno de los cuales es atravesado por el móvil que se mueve con un movimiento uniformemente acelerado a partir del reposo, y el otro, en el mismo tiempo, por un móvil que se mueve con movimiento uniforme con una velocidad igual a la mitad de la velocidad máxima alcanzada en el movimiento acelerado, son iguales, es evidente que los espacios *MH*, *LH* son los mismos que los que serían atravesados por movimientos uniforme cuyas velocidades fueran como las mitades de *PE*, *OD*, en los tiempos *EA*, *DA*. Así pues, si se demostrara que los espacios *MH*, *LH* están en proporción doble de los tiempos *EA*, *DA*, nuestro teorema estaría demostrado. Ahora bien, [...] [habiéndose] demostrado que los espacios recorridos por los móviles que se mueven a una velocidad uniforme tienen entre sí una proporción compuesta de las proporciones de velocidad y tiempo; pero aquí la proporción de las velocidades es la

misma que la proporción de los tiempos (efectivamente, la proporción de la mitad de *PE* a la mitad de *OD*, o de la entera *PE* a la entera *OD* es también la de *AE* a *AD*). Luego la proporción de los espacios atravesados es doble de la proporción de los tiempos (Galileo, cit. Koyré 1980, págs. 142-143).

Los estudios de Galileo se consagraron como corolario de uno de los mayores logros intelectuales de su época, ya que consiguieron someter al movimiento y, por consiguiente, al tiempo, a la ley del número entero.

Años después, Robert Boyle, a partir de los estudios realizados por Galileo y Descartes, impulsó una filosofía de corte mecanicista que, pese a reconocer la reducibilidad de los fenómenos naturales a interacciones mecánicas entre corpúsculos de materia, 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 impenetrable¹¹⁰» (Boyle 2017, pág. 10). Ante tal concepción de la materia, Boyle defiende que la diversidad de los cuerpos presentes en la naturaleza debe tener su origen en algo que, siendo distinto a ella, sea universal: el movimiento. Boyle alude al movimiento como el causante del comportamiento de los fenómenos.

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 movimiento¹¹¹ (*Op. cit.*, pág. 11).

Con ánimo de mostrar el papel que el movimiento desempeña a la hora de conformar los distintos fenómenos naturales, Boyle hace uso de la metáfora de la

¹¹⁰ La traducción es mía.

¹¹¹ La traducción es mía.

maquinaria interna de un reloj. 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.

De igual modo, dado que toda la materia es una y la misma, toda la aparente diversidad que presentan los fenómenos naturales se originan 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, Boyle distingue el tamaño, la forma y el movimiento (o reposo), en contraposición a las consideradas cualidades secundarias, las cuales se originan según el modo en que dichas cualidades primarias inciden en nuestros órganos sensoriales. Cito a 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 mencionadas¹¹² (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

¹¹² La traducción es mía.

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. El mecanicismo de Boyle no se ve restringido 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 mundo en su conjunto. Asimismo, 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 fines¹¹³.

Además de Boyle, otro autor que contribuyó consustancialmente a conjeturar una hipótesis mecanicista sobre el funcionamiento del mundo, fue el filósofo John Locke, quien además de ser un ferviente defensor del empirismo, adscribió su filosofía a la existencia de corpúsculos materiales que, según el autor, son imperceptibles. La dimensión filosófica del mecanicismo de Locke refuta, por un lado, la identificación cartesiana entre materia y extensión y, por otro, rechaza toda posibilidad de alcanzar un conocimiento perfecto de las entidades 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, entre las que destaca

¹¹³ Si bien es cierto, hay que 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.

«la solidez, la extensión, la forma, el movimiento, el reposo y el número» (*Op. cit.*, pág. 13). A juicio de Locke, estas cualidades primarias existen, es decir, son reales más allá de que puedan ser o no percibidas por los sentidos.

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 una serie de cualidades secundarias a las que denomina 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.

Locke incluye un tercer tipo de cualidades. Este tercer tipo de cualidades presentes en los cuerpos se predisponen como disposiciones de determinadas configuraciones que asume la materia corpuscular de un cuerpo que permiten alterar a su vez las cualidades primarias de este. Locke ilustra estas cualidades terciarias a través del ejemplo del fuego:

La potencia en el fuego de producir un nuevo color o distinta consistencia en la cera o en el barro por medio de sus cualidades primarias, tan es una cualidad en el fuego, como lo es la potencia que tiene para producir en mí, por medio de esas mismas cualidades primarias [...] una nueva idea o sensación de calor o ardor que no sentía antes (*Op. cit.*, pág. 114).

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, en su *Ensayo*, Locke atiende a explicaciones que describen los fenómenos naturales en términos análogos al funcionamiento de las máquinas. Al igual que Boyle, Locke se vale de la metáfora del reloj para explicar cómo se predisponen los diferentes elementos que conforman el cuerpo de todo ser vivo.

¿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 el cuerpo de un animal, en su *Ensayo*, Locke introduce una serie de pasajes en los que sugiere que el mundo se comporta como una inmensa maquinaria gobernada por leyes naturales. 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).

Con este fragmento, Locke extiende las operaciones corpusculares de los fenómenos particulares al funcionamiento del universo en su totalidad, obteniendo así una visión del mundo análoga al funcionamiento de una gran máquina. Por analogía, Locke intuye una clase de inferencia ampliativa que permite generar hipótesis sobre el modo de interacción corpuscular. Si bien es cierto, Locke niega la posibilidad de alcanzar una ciencia perfecta de los cuerpos, ya que, dadas nuestras limitaciones como agentes gnoseológicos, solo es posible alcanzar unos ciertos conocimientos prácticos de raigambre probabilística. Precisamente por esto, Locke se vale de la analogía como un tipo particular de inferencia ampliativa; de ahí que sostenga en su *Ensayo*:

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 el nacimiento de las leyes que rigen la mecánica celeste, las cuales llevan su nombre. A diferencia de sus predecesores corpuscularistas, las aportaciones de Newton facilitaron la incorporación de nuevas categorías bajo las cuales identificar y estudiar las propiedades esenciales que constituyen la materia.

Newton, siguiendo la herencia corpuscular legada por sus predecesores, estableció una serie de propiedades esenciales en los cuerpos naturales. 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 se conoce como primera ley de Newton o ley de la inercia, y sostiene 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, además de revolucionar los conceptos básicos de la física de los cuerpos, supusieron una consolidación formal de la metáfora mecanicista.

Las leyes de Newton¹¹⁴ responden a los cánones del ideal de sistematización deductiva, ya que se construyen sobre un conjunto de definiciones, axiomas y teoremas deducidos de estos axiomas¹¹⁵.

El origen de estas leyes parte de la observación del mundo natural. Si alguien desea cambiar la posición de un cuerpo en reposo, necesita empujarlo o levantarlo; es decir, ejercer una cierta acción sobre este. Para Aristóteles, el movimiento de un cuerpo se detiene cuando la fuerza que lo empuja deja de actuar. Con el tiempo, se demostró que las ideas del Estagirita eran erróneas, pero fue tal el prestigio de Aristóteles que sus ideas perduraron muchos siglos. Siglos más tarde, con la implementación del método experimental, Galileo puso en duda las conclusiones intuitivas basadas en la observación sensible, ya que estas conducían a menudo a equivocaciones. Las indagaciones llevadas a cabo por Galileo le permitieron extrapolar sus observaciones al terreno de la verificación experimental. Al observar como un cuerpo se desplazaba con velocidad constante por una superficie lisa, Galileo intuyó que este se desplazaría sempiternamente si no se viese sometido a fuerzas externas o a cualquier tipo de rozamiento, comenzando a considerar parámetros de movimiento que indicaran la acción de fuerzas externas. Newton fue el primero en dar una formulación mecanicista a este problema a partir de sus tres leyes: No es la velocidad, sino su variación la consecuencia resultante de la acción de arrastrar o empujar un objeto.

Las leyes de Newton permitieron incorporar un nuevo repertorio de conceptos con los que analizar el mundo, así como los procedimientos matemáticos necesarios para explicarlos y describir cuantitativamente el mundo a partir de ellos. Al concebir las fuerzas continuas a partir de una generalización de sucesivas fuerzas impulsivas e instantáneas, Newton demostró que «las áreas que los cuerpos en revolución describen mediante radios trazados hasta un

¹¹⁴ Pese a haber resuelto el problema del movimiento de dos cuerpos, las leyes de Newton presentan serias dificultades a la hora de abordar el problema de tres cuerpos, ya que este último no puede reducirse un cuerpo atraído por un centro fijo, tal y como ocurre con el problema de dos cuerpos.

¹¹⁵ Véase Anexo III.

centro de fuerza inmóvil se encuentran en los mismos planos inmóviles y son proporcionales a los tiempos en los que se describen» (Newton 1987, pág. 74). A partir de sus leyes, Newton fue capaz de dar cuenta de que una masa esférica y homogénea es equivalente a una masa puntual con la misma cantidad de masa, algo que permitió dar cuenta de los movimientos de los planetas en torno al Sol al considerar el sistema solar como un sistema de masas puntuales que interactúan de acuerdo a la ley del inverso al cuadrado.

4.2.3. Evolucionismo

Así como la *phýsis*, el evolucionismo 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*¹¹⁶, recuperó algunas generalizaciones de la ley del desarrollo embriológico de Karl M. Baer. Spencer sostiene que todas las estructuras biológicas se desarrollan desde una simple e indiferenciada homogeneidad a una compleja y diferenciada heterogeneidad a partir de un proceso de mayor integración de las partes diferenciadas. Cito a Spencer:

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

¹¹⁶ Del original en inglés: *Progress: Its Law and Cause*. En este trabajo, Spencer desarrolló la base teórica que más tarde daría lugar a su obra *Primeros principios de un nuevo sistema de filosofía*. Del original en inglés: *First Principles of a New System of Philosophy*, publicada esta última en 1862.

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 elementos constituyentes; así, posiblemente, esta transformación universal de lo simple en lo complejo puede estar afiliada a ciertos principios primordiales simples¹¹⁷ (Spencer 1865, pág. 219).

Esta idea no solo es aplicable a los organismos vivos, sino que se extiende al cosmos en su totalidad y, por consiguiente, a la organización social y humana. Así lo expresa el propio Spencer

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 civilización¹¹⁸ (*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.

¹¹⁷ La traducción es mía.

¹¹⁸ La traducción es mía.

- 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.

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 natural¹¹⁹» (Spencer 1898, pág. 225).

La analogía orgánica, cuya identidad estructural y relacional se construye sobre la premisa de continuidad entre los procesos biológicos y el desarrollo de una sociedad, se manifestó lingüísticamente bajo la metáfora: «La sociedad es un organismo¹²⁰» (Spencer 1898, pág. 449). La analogía orgánica dio paso a una metáfora orgánica –o evolucionista– que establecía el progresivo proceso de diferenciación y crecimiento en complejidad que tiene lugar tanto en seres vivos como en el seno de toda 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 coherente¹²¹» (Spencer 1865, pág. 446). En este sentido, dado el carácter determinista que subyace a la metáfora, la evolución no solo se percibe como un fenómeno lineal y progresivo, sino que excluye toda idea de potencialidad, ya que la evolución se rige bajo esquemas teleológicos predeterminados.

¹¹⁹ La traducción es mía.

¹²⁰ 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.).

¹²¹ La traducción es mía.

La premisa teórica que da lugar a la metáfora evolucionista parte de la propia observación experimental. 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. Desde una perspectiva sistémica, podemos considerar a todo organismo como un sistema en continuación interacción o intercambio de materia, energía e información con otros procesos. Al igual que ocurre con los organismos, la metáfora orgánica de Spencer puse en interacción a su vez otras metáforas que sirvieron de basamento teórico a su teoría de la evolución. Un ejemplo sería la persistencia de la fuerza (*Op. cit.*, pág. 251), con la que Spencer busca aplicar el principio de conservación de la fuerza al análisis de la evolución, atribuyendo a esta última un carácter dinámico. Este carácter dinámico descansa en las leyes del movimiento y de transformación de la materia, rescatando así una visión mecanicista de la naturaleza estrechamente ligada al modelo cinético corpuscular.

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 de Spencer, formuló su teoría de la evolución por selección natural, una elegante metáfora que expresa con sencillez una idea de gran profundidad y extraordinarias implicaciones. 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).

[...]

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 innovadora descartaba todo presunto determinismo en la naturaleza y, por consiguiente, en contraposición a Spencer, negaba la teleológica tendencia de la evolución hacia una predeterminada perfección, encarnada en su máxima expresión por el ser humano. Esta tendencia teleológica, o *telos*, 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 de Spencer reside en su esfuerzo por extender la idea de evolución a todas las esferas de desarrollo, considerando que el desarrollo de una sociedad

se encuentra atada a los mismos procesos naturales que afectan al resto de los seres vivos.

4.3. Metáfora y ciencia teórica

Se denomina física teórica a aquella parte de la física que estudia los fenómenos relativos a la estructura interna de la materia, fenómenos que se escapan por completo a toda observación directa y cuyo comportamiento se acomete predictivamente a partir de modelos formalizados matemáticamente. La complejidad resultante del intento por mejorar la adecuación y formalización matemática acompañada de una erosión en el significado de los términos utilizados para describir el mundo físico tiene su origen con la metodología seguida por Einstein en la construcción de la teoría de la relatividad.

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

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 relatividad¹²² (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 básicos. 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 traslación¹²³» (*Op. cit.*,

¹²² La traducción es mía.

¹²³ La traducción es mía.

págs. 8-9). Es decir, según este segundo axioma, 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 estado 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 naturales 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 refiere a la coincidencia en el tiempo de dos sucesos diferentes con independencia del sistema de referencia adoptado; sin embargo, en un esquema relativista, esta noción de 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 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.

Posteriormente, Einstein recurre de nuevo a este principio de covariancia y lo extrapola a su teoría de la relatividad general, en la que la noción de covariancia se aplica a sistemas de referencia no inerciales; es decir, sistemas que se mueven de forma acelerada. 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 medibles. En el caso del descenso de un cuerpo sometido al campo gravitatoria, 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 se convierte junto a la matemática en medios de representación de los fenómenos físicos. Esto es posible gracias a la simbología matemática, ya que a raíz de un cambio en su significación permite la construcción de teorías futuras a partir de la vinculación lógica y deductiva de sus postulados.

En consecuencia, la imagen que se obtiene de las teorías relativistas no es la misma que la proporcionada por las teorías newtonianas. La imagen relativista del universo 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.

Al igual que la relatividad, muchas han sido las nuevas propuestas gestadas en el campo de la física teórica que han conducido a un cambio de paradigma en nuestra imagen del mundo y cuya naturaleza, al igual que la relatividad, responde a una aproximación metafórica al estudio de la realidad. Veamos algunas de ellas.

4.3.1. Teoría de cuerdas

La cada vez más, la compleja formalización matemática ha desplazado progresivamente a la ciencia del ámbito de la experimentación y la ha acercado a un terreno de creciente especulación, en ocasiones, con débil respaldo empírico. A la luz de esta situación, cada vez son más las metáforas que buscan dar cuenta de enigmáticas y pretendidas realidades nuevas ajenas hasta la fecha de toda resolución experimental, sobre todo aquellas cuya compleja formulación busca dar una visión unitaria de todos y cada uno de los fenómenos conocidos. Una de estas metáforas unificadoras actuales y que ha requerido un mayor esfuerzo en su formalización 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 de acuerdo con un lenguaje simbólico, 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. Como en toda teoría, a este recurso simbólico se le asignaron posteriormente una serie 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 posteriores interpretaciones de este planteamiento 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 más básico al que se le da el nombre de cuerda. Lo importante aquí es que esta representación visual obedece a la de una figura unidimensional. De acuerdo con esta representación, esta cuerda remite a un objeto idealizado. La imagen curvilínea de la cuerda se construye a partir de un diagrama gráfico usado para representar los resultados cuantitativos obtenidos en la observación experimental. En otras palabras, la cuerda responde a una metáfora idealizada a la que se ha atribuido una serie de propiedades físicas que permiten establecer predicciones matemáticas sobre el comportamiento de las partículas elementales y sus interacciones. Es más, esta imagen no asume una existencia real, pues es fruto de una especulación teórica; sin embargo, sí permite una descripción teórica de la estructura de la materia a partir de una aproximación metafórica al estudio de la realidad.

Dada su imagen visual, la metáfora de la cuerda permite la formulación de conceptos y la comprensión de fenómenos que quedan fuera de toda manipulación sensible. La descripción de estos procesos físicos se hace por vía metafórica, es decir, a través de una serie de correlaciones parciales de identidad que capturan una serie de propiedades atribuibles a la noción de cuerda a partir de dominios de experiencia más inmediatos en nuestra intuición sensible del mundo. De acuerdo con ello, la noción de cuerda no asume existencia real, pues sirve solo como una noción simbólica que adquiere significado dentro de la propia teoría.

4.3.2. 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 su analogía en cuanto a la disposición geométrica de las partículas que conforman el átomo. El núcleo — donde se concentra la mayor cantidad de masa dentro del conjunto — actúa de forma análoga al Sol. La metáfora proyecta una correspondencia formal entre los electrones que giran alrededor del núcleo y los planetas del modelo heliocéntrico. Como toda metáfora, esta preserva la disposición geométrica de las partículas atómicas, equiparando el núcleo con el Sol, ambos como puntos de masas central; sin embargo, cuando se establece una correspondencia analógica entre ambos dominios de tipo energético, la metáfora planetaria del átomo sufre serias limitaciones.

La 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 común acerca de la naturaleza planetaria. 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 entidades simbólicas; es decir, como idealizaciones construidas teóricamente. Dicho de otro modo, las construcciones simbólicas no obedecen a un reflejo especular de una entidad del mundo físico, sino que funcionan como posibles soluciones fruto de la idealización que sirven para dar cuenta de una presunta entidad física híbrida, sin esperar que esta última adquiriera en el mundo real unas características similares.

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 Higgs¹²⁴.

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 que presentan dichas entidades y fenómenos. En cualquier caso, a pesar de que las idealizaciones teóricas de las que hace uso la ciencia no se someten a los cánones de la lógica intuitiva, estas proporcionan una trama formal coherente con la que predecir resultados verificables por vía experimental. Asimismo, este lenguaje simbólico utilizado es inseparable de la teoría, siendo esta la que confiere un estenosignificado preciso, ya sea de índole matemática o física, cuya validez reside en facilitar la posterior verificación experimental. Este lenguaje, a su vez, permite la idealización de entidades, propiedades y relaciones construidas expresamente para desempeñar un papel central en la formulación teórica. La formulación teórica asigna significado físico a valores numéricos, proporcionando así un tipo solvente de conocimiento del fenómeno estudiado a través del lenguaje simbólico.

¹²⁴ 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.

5. CONCLUSIÓN

Como pilares moduladores del lenguaje y el pensamiento, la metáfora y la analogía 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.

CONCLUSIONES GENERALES

El constructivismo suscribe la tesis de que 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.

Como filosofía de la ciencia, el constructivismo considera que la ciencia y la cognición comparten intereses similares. Ambos dominios pueden describirse 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, el éxito predictivo a partir de los modelos utilizados en la investigación y, en el caso de la cognición, una amplia gama de estrategias funcionalmente exitosas que permitan salvaguardar una imagen viable del mundo en la dinámica interna del sistema. Al pensar la ciencia como una extensión de nuestra apertura cognitiva al mundo, el constructivismo adopta esta noción de viabilidad, es decir, de ajuste funcional con el entorno, como fundamental en la correcta aproximación al estudio tanto de la cognición como de la modelización, ya que, al igual que ocurre con las estructuras y procesos que conforman la arquitectura cognitiva de cualquier sistema de observación, más o menos evolucionado, los modelos en ciencia se

encuentran limitados por su propia estructura teórica, así como por su dinámica operativa.

Cognición	Modelización
La arquitectura cognitiva del sistema de observación impone los límites últimos a la hora de representar la realidad.	La estructura teórica del modelo limita su capacidad predictiva y su dominio de aplicabilidad.
La representación obedece al resultado de la dinámica interna del propio sistema y no a un mapeado especular del mundo.	Los modelos no funcionan como cartografías referenciales acerca de cómo es el mundo, sino como abstracciones matemáticas con las que intervenir en este a partir del cálculo y la predicción.
El mundo responde a un acto de construcción activo por parte del observador.	El mundo queda reducido a las hipótesis de partida y al alcance predictivo de las mismas.
Toda referencia a una realidad independiente situada más allá del horizonte cognitivo de todo sistema de observación responde a una especulación metafísica.	Los modelos no asumen valor metafísico alguno.
La cognición asume carta de naturaleza adaptativa cuyo imperativo biológico persigue generar un comportamiento funcionalmente exitoso con el medio que garantice la supervivencia del sistema.	Los modelos buscan acometer el estudio del mundo físico a partir de la viabilidad predictiva de sus postulados, o lo que es lo mismo, de su estructura teórica.

Este proceso de modelización, es decir, de formalización teórica del mundo físico, comienza en la fase de observación con la captura de regularidades y patrones de comportamiento procedentes de la realidad observable. Estas regularidades se manifiestan en el dominio de la experiencia como patrones sistemáticos dentro de un esquema espacial y temporal. Estos patrones son, a su vez, sistemas relativos y constituyen el marco conceptual para construir las ulteriores relaciones funcionales, de modo que para predecir y anticipar el comportamiento

de cualquier fenómeno resulta necesario estudiar los mecanismos que los originan aislando estados, transiciones y correlaciones y así poder salvar las regularidades y patrones de comportamiento observados en el mundo físico. Durante todo el proceso de construcción del conocimiento, tienen lugar distintas fases de decodificación de la información. En primer lugar, el sistema cognitivo construye correlaciones parciales de identidad — analogías — entre los patrones y regularidades observadas a partir de sus mecanismos de retroalimentación. Estos patrones y regularidades no están presentes en el mundo, sino que se construyen a través de un proceso activo de búsqueda limitado por los patrones y regularidades del propio sistema. En segundo lugar, los mecanismos cognitivos proceden a una descripción formal y abstracta de dichos patrones y regularidades, los cuales, a su vez, constituyen el basamento teórico sobre el que operará el modelo en cuestión.

En este sentido, el constructivismo, en oposición al representacionalismo tradicional, busca modular el talante epistemológico de la ciencia, desestimando la noción clásica de conocimiento como una cartografía referencial del mundo y considerando esta como un medio de ordenación de campos cada vez más amplios de experiencia, o lo que es lo mismo, como el número de posibilidades a la hora de elegir el modo más adecuado de intervenir predictivamente en el mundo dadas unas condiciones determinadas. Como prolongaciones exosomáticas de nuestros sentidos fundamentadas en el cálculo y la predicción, los modelos potencian nuestra capacidad de apreciación de la realidad, reduciendo esta a su síntesis cuantitativa a partir de la abstracción teórica y la formalización matemática. Este proceso de modelización de la realidad encuentra su justificación epistemológica en el constructivismo, donde, al adscribirse a las categorías de viabilidad y funcionalidad, los modelos redefinen la noción clásica de conocimiento al vincularla con la construcción de relaciones funcionales entre el mundo físico y su formalización matemática para satisfacer una meta predictiva.

Con ánimo de refrendar empíricamente esta tesis, he examinado algunos de los problemas originados en torno al fenómeno de la modelización en ciencia. En primer lugar, me he adentrado en el dominio de la macrofísica para así contrastar los postulados y entidades teóricas que subyacen al Modelo Mecanicista de Newton [MMN] frente a los que integran el Modelo Relativista de Einstein [MRE]. Durante más de dos siglos, el MMN se adaptó a nuestro modo de entender el mundo, un mundo que apelaba a la relación de causa-efecto y que se disfrazaba bajo la metáfora del universo como una gran maquinaria. Pero con la llegada del siglo XX, los nuevos desafíos reinterpretados desde el estudio de la relatividad —el avance del perihelio de Mercurio, la desviación de la luz por el Sol o el corrimiento gravitacional hacia el rojo— revelaron las limitaciones del MMN en lo que respectaba a su presunta aplicabilidad universal, sobre todo a la hora de estudiar fenómenos originados en campos gravitatorios de gran intensidad o en velocidades cercanas a la de la luz. Lo mismo ocurre con modelos circunscritos al dominio de la microfísica, como el Modelo Nuclear de Capas [MNC] y el Modelo Nuclear de Gota Líquida [MNGL], analizados también en este trabajo. Ambos modelos —MNC y MNGL— permiten salvar por separado algunos fenómenos cuánticos —el MNC salva la existencia de los números mágicos mientras que el MNGL salva la estabilidad de los núcleos permitiendo predecir así su energía de unión—; sin embargo, los postulados y entidades teóricas sobre las que ambos modelos se asientan se muestran incompatibles entre sí, por lo que, al igual que ocurre entre el MMN y el MRE, resulta ilógico señalar ninguno de los dos —MNC y MNGL— como fieles representaciones del núcleo atómico.

Por último, en lo relativo a las reglas de funcionamiento y principios de organización de la experiencia, he examinado también el papel que asumen la analogía y la metáfora en la investigación científica, y más concretamente durante la fase de modelización. Como estrategias inherentes a nuestro modo de interpretar y representar el mundo, la analogía y la metáfora permiten conectar el mundo físico con su formalización simbólica a partir de bellas relaciones. Mientras que la analogía facilita una correspondencia parcial de identidad entre

dos dominios de experiencia, la metáfora permite la apertura significativa del observador, así como su capacidad creativa para extender su propia percepción del fenómeno.

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 podemos traer a colación las analogías establecidas 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, las cuales sirvieron como punto de partida para abordar una nueva concepción de la gravedad. Asimismo, dado el basamento analógico sobre el que esta opera, la metáfora permite dotar de estructura inferencial un nuevo dominio a partir de la puesta en interacción de una serie de rasgos previamente asociados. Un ejemplo de ello serían las nociones de fluido electromagnético, línea de corriente o cuerda elástica, en las que la metáfora facilita el discurso de la razón al descansar sobre imágenes que en ningún caso constituyen una descripción literal de la realidad física, sino un nuevo escenario conceptual donde esta se torna manifiestamente comprensible gracias a una aproximación metafórica del fenómeno.

Es innegable que el potencial gnoseológico de ambas estrategias –analogía y metáfora– se hace patente en la investigación científica, facilitando 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 –, ya que estas asumen otros valores epistémicos, sino de diferentes perspectivas con las que el observador, o sea el científico, entiende y da sentido y valor a una nueva realidad desvelada por la ciencia.

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.

— *De Motu, The Works of George Berkeley, Vol. 1: Philosophical Works, 1705-21*. Clarendon Press: Oxford, 2012.

BERNABÉ, A. *Fragments 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. *Critica 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, 1994a.
- 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.
- SIMPSON, G. G. *This View of Life: The World of an Evolutionist*. Harcourt, Brace & World: New York, 1964.
- 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 Italorum 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.
- 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' AQUILL, 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* (2^a 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.
- BONIOLO, G.; PETROVICH, C. & PISENT, G. «Notes on the Philosophical Status of Nuclear Physics», *Foundations of Science*, 7, 2002, págs. 425-452.
- 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.
- CHAPMAN, A. J. *Transmisión del calor*. Bellisco: Madrid, 1984.

- 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.
- DAVIES, P. C. W. & BROWN, J. R. *El espíritu del átomo. Una discusión sobre los misterios de la física cuántica*. Alianza: Madrid, 1989.
- 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.
- «How Models Are Used to Represent Reality», *Philosophy of Science*, 71, 2004, págs. 742-752.
- 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.
- HELMHOLTZ, H. «Vorlesungen über Theoretische Physik». Bd. VI: Vorlesungen, 1922.
- 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. *Critica 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.
- 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.
- MOULINES, U. *Pluralidad y recursión. Estudios epistemológicos*. Alianza: Madrid, 1991.
- *Popper y Kuhn, dos gigantes de la Filosofía de la ciencia del siglo XX*. Bollaetra 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. Gaussier & 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.
- SALAS, I. «On (Inter)Theoretical Incompatibility in Science. A Conciliatory Proposal from a (Not So) Radical Constructivism». Academia, 2017a.
- «The Limits of Scientific Modelling: Empirical Success and the Argument of Non-Representativeness». Academia, 2017b.
- SANTO TOMÁS. *The "Summa Theologica" of St. Thomas Aquinas. Part I QQ I.-XXVI*, en *Padres de la Provincia Dominicana Inglesa (Trad.) (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.
- STEWART, I. *¿Juega Dios a los dados?* Crítica: Madrid, 1996.
- & 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.
- 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'AQUILI, 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- ARISTÓTELES. *Acerca de la generación y la corrupción*. Madrid: Gredos, 1987.
- ARISTÓTELES. *Política*. Madrid: Gredos, 1988.
- ARISTÓTELES. *Metafísica*. Madrid: Gredos, 1994.
- ARISTÓTELES. *Física*. Madrid: Gredos, 1995.
- ARISTÓTELES. *Acerca del cielo*. Madrid: Gredos, 1996.
- ARISTÓTELES. *Poética*. Fondo Blanco Editorial (Versión online), 2014.
- 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.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. *Los muchos rostros de la ciencia.* La Ciencia para Todos, FCE: México, 2003.
- 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.
- HOFFMANN, B. *Einstein.* Biblioteca Salvat: Madrid, 1987.
- 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.
- MARGENAU, H. *La naturaleza de la realidad física*. Tecnos: Madrid, 1970.

- MÁRSICO, C. *Polythrýleta. Sistemas explicativos y mutación conceptual en el pensamiento griego*. Editorial Rhesis: Buenos Aires, 2011.
- MOSTERÍN, J. *Ciencia, filosofía y racionalidad*. Gedisa: Barcelona, 2013.
- 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.
- ORTEGA Y GASSET, J. «Las dos grandes metáforas» *Obras completas*, Tomo II (1916-1934), Ediciones Castilla: Madrid, 1963, págs. 387-400.
- 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 Tellus*, 32-2, 2015, págs. 57-73.
- RUSELL, B. *Historia de la filosofía occidental. Tomo 1*. 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.

- SALGUERO-LAMILLAR, F. J. «Sobre ficción, lenguaje, (con)ciencia y modelos de interpretación», *Philologia Hispaliensis*, 27/3-4, 2013, págs. 113-138.
- SALVATICO, L. *Depurando el mecanicismo moderno*. Editorial Brujas: Córdoba (Argentina), 2006.
- SAMBURSKY, S. *El mundo físico de los griegos*. Madrid: Alianza, 1990.
- 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.
- 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):

- 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.
- GALILEO. *El ensayador*, en J. M. Revuelta (Trad.). Aguilar, Sarpe: Buenos Aires, 1984.
- LAÍN ENTRALGO, P. *La medicina hipocrática*. Revista de Occidente: Madrid, 1970.
- LAÍN ENTRALGO, P. *El cuerpo humano: Oriente y Grecia Antigua*. Espasa: Madrid, 1987.
- 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.
- 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, 52, 53
a priori, 49, 52, 53, 145, 160, 204
abstracción, 53, 94, 95, 182
accidente, 50, 192
acoplamiento estructural, 58, 59
adaptación, 52, 59, 60, 70, 71
agujero negro, 113, 118
análisis, 5, 20, 23, 40, 42, 62, 97, 113, 115,
124, 133, 143, 144, 180, 201, 224, 241
análisis categorial, 144
analogía, 6, 45, 96, 129, 148, 149, 151,
152, 153, 157, 158, 159, 163, 164, 165,
166, 167, 170, 171, 172, 189, 196, 199,
201, 202, 204, 206, 218, 221, 222, 223,
224, 231, 259
analogía orgánica, 221, 222, 223, 224
aprendizaje, 30, 52, 64, 81
Aristóteles, 33, 37, 44, 83, 86, 97, 172,
175, 184, 186, 187, 189, 191, 192, 193,
194, 195, 196, 197, 201, 210, 220, 241,
258
asimilación, 32, 61
Asimov, 148, 149, 258
auto-organización, 60
autopoiesis, 57, 66
auto-regulación, 60
Avicena, 44
Berkeley, 46, 47, 241
Bernhard Riemann, 169
bisociación, 173
bosón de Higgs, 231, 233
Brunswik, 241, 253
calor, 40, 41, 69, 101, 103, 162, 202, 214,
216, 247
campo magnético, 155
cantidad, 50, 81, 95, 106, 118, 131, 157,
158, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 180,
209, 230, 231
Carl Friedrich Gauss, 169
caso límite, 107, 110, 111
causa, 34, 48, 50, 59, 68, 108, 119, 191,
192, 195, 199, 216, 238
causalidad, 49, 50, 62, 65, 124, 221, 232
causalidad circular, 65
Charles R. Darwin, 224
cibernética, 36, 65, 66, 241, 245
ciclo funcional, 54, 55, 56, 67
ciencia, 3, 6, 15, 18, 21, 28, 39, 81, 82, 83,
85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 96, 97, 99,
102, 104, 105, 107, 108, 113, 114, 123,
124, 134, 135, 137, 139, 145, 146, 147,
148, 153, 154, 157, 159, 163, 174, 177,
178, 179, 180, 182, 183, 187, 198, 199,
206, 217, 218, 228, 229, 233, 234, 242,
248, 249, 250, 251, 253, 254, 258, 259,
261, 262
circularidad, 69
codificación no diferenciada, 68
cogito, 41
cognición, 5, 6, 15, 20, 29, 32, 77, 90, 93,
204, 247, 258
conductividad térmica, 101, 103
conjetura, 104
conocimiento, 27, 29, 30, 32, 37, 39, 40,
44, 45, 47, 51, 52, 53, 57, 59, 60, 66, 72,
81, 85, 88, 90, 91, 92, 99, 123, 144, 147,
148, 151, 154, 173, 175, 179, 183, 204,
214, 215, 233, 245, 247, 262
constante de acoplamiento, 230
constante de Planck, 129, 157, 158
constante de Stephan-Boltzmann, 126
constructivismo, 5, 6, 29, 31, 32, 36, 39,
48, 51, 53, 59, 65, 67, 77, 90, 93, 95,
137, 242, 246, 247, 249, 254
constructivismo radical, 70
contracción de longitud, 169
contracción de Lorentz, 169
corporeidad, 42
correspondencia, 73, 85, 86, 88, 100, 111,
151, 152, 154, 162, 231
creatividad, 19, 148, 178, 183
Cristina Bicchieri, 99
cruzamiento selectivo, 97
cualidad, 50, 202, 208, 216
cuanto, 9, 28, 47, 54, 56, 68, 82, 117, 127,
144, 157, 173, 176, 184, 189, 192, 195,
197, 225, 231
cuanto de luz, 159

cuerda elástica, 175
 cuerpo negro, 125, 126, 127, 128, 135, 157, 158
 Demócrito, 36, 90, 91, 198, 200, 241, 248
 denominación, 172, 174, 186
 dependencia, 50, 101, 103, 218
 derivación de Weizsaecker, 135
 desarrollo ontogenético, 56, 59
 Descartes, 40, 41, 42, 43, 199, 206, 207, 208, 209, 210, 213, 241, 259
 desplazamiento analógico, 100, 159, 160, 167
 desplazamiento conceptual, 112, 171
 diagramas de Venn, 181
 dimensión, 66, 93, 148, 153, 170, 171, 175, 188, 196, 209, 215
 dimensión diafórica, 172
 dimensión epifórica, 171
 dinámica ambiental, 93
 Dios, 27, 39, 40, 43, 46, 47, 48, 102, 200, 209, 215, 244, 252
 disyunción, 181
 dominancia, 97
 dualidad, 123, 231, 232
 duda metódica, 42
 Duhem, 84, 199, 248, 259
 ecuación de Poisson, 103
 ecuaciones de Kepler, 116
 ecuaciones de transformación de Lorentz, 270
 educación, 44
 efecto, 6, 29, 34, 38, 40, 50, 52, 59, 62, 69, 108, 110, 119, 159, 167, 176, 184, 191, 192, 194, 195, 213, 238, 270
 Egon Brunswik, 52
 empirismo, 215
 energía, 67, 69, 100, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 135, 144, 146, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 177, 182, 224, 230, 270, 271
 energía de enlace, 129
 enfoque sistémico, 72
 entidad, 42, 45, 47, 62, 165, 177, 184, 186, 187, 191, 192, 197, 203, 208, 232, 233
 epistemología, 5, 29, 48, 51, 59, 65, 149, 174, 243
 epistemología evolutiva, 51
 epistemología genética, 59, 243
 equilibrio, 61, 103, 125
 equilibrio calorífico, 103
 equilibrio termodinámico, 125
 Ernst Haeckel, 51
 Ernst Von Glasersfeld, 70
 espacio, 49, 54, 57, 62, 94, 96, 111, 112, 117, 120, 121, 128, 132, 167, 168, 169, 170, 174, 176, 177, 208, 211, 212, 226, 227, 228, 232, 274
 espín, 132, 133, 145
 esquema, 34, 55, 56, 59, 61, 73, 89, 90, 93, 133, 143, 144, 152, 178, 180, 187, 227
 estado, 58, 59, 64, 69, 95, 108, 124, 132, 190, 193, 194, 196, 198, 203, 206, 210, 216, 219, 221, 227, 275
 estelar, 91, 126, 127
 existencia, 31, 32, 39, 41, 42, 45, 50, 52, 82, 88, 116, 122, 132, 133, 134, 135, 148, 159, 166, 177, 187, 193, 200, 207, 208, 215, 219, 230, 233
 éxito empírico, 6, 107, 128, 270
 éxito predictivo, 16, 119, 127, 131, 132
 experiencia, 30, 32, 33, 37, 39, 42, 45, 46, 49, 52, 53, 55, 56, 62, 63, 70, 72, 81, 92, 93, 124, 145, 147, 151, 152, 153, 160, 173, 174, 176, 177, 179, 182, 183, 188, 193, 198, 206, 227, 230, 231
 explanandum, 93
 explanans, 93
 facultad, 100, 177, 183, 204
 ficción, 100, 262
 filosofía, 39, 86, 108, 144, 186, 196, 199, 200, 201, 204, 210, 213, 215, 217, 221, 248, 258, 259, 261
 fluido electromagnético, 153, 175
 forma, 18, 19, 27, 30, 32, 35, 36, 38, 45, 46, 49, 52, 53, 55, 56, 59, 61, 63, 70, 71, 73, 86, 87, 93, 99, 102, 103, 105, 116, 126, 129, 132, 134, 144, 145, 146, 153, 158, 160, 162, 163, 164, 167, 168, 170, 177, 179, 180, 181, 186, 189, 191, 192, 193, 197, 199, 201, 202, 203, 205, 207, 208, 209, 213, 214, 216, 217, 227, 270, 274
 fórmula de Weizsaecker, 129
 Francisco Varela, 57

François Englert, 232
 Friedrich Max Müller, 143
 fuerza, 31, 40, 96, 110, 117, 120, 129, 144, 146, 148, 166, 168, 182, 188, 189, 190, 195, 200, 210, 216, 217, 219, 220, 221, 224, 228, 232, 270, 275
 fuerza ficticia, 166, 168
 función armónica, 175
 funcionamiento biológico, 60, 64
 Galileo, 39, 91, 102, 159, 160, 175, 176, 210, 211, 212, 213, 220, 254, 258, 259, 262, 270
 genio maligno, 43
 George Berkeley, 241
 Gerhard Roth, 68
 gramática generativa, 98
 Grecia Antigua, 262
 Gustav Robert Kirchhoff, 125
 Heinz Von Foerster, 65
 Heisenberg, 121, 122, 123, 147, 249, 255, 259
 Herbert Spencer, 221
 hipótesis, 18, 63, 70, 83, 84, 85, 97, 100, 106, 107, 110, 135, 150, 153, 206, 215, 218, 233, 251
 historia, 5, 7, 32, 36, 38, 59, 60, 85, 91, 93, 97, 107, 108, 114, 147, 155, 163, 183, 186, 199, 225, 261
 Humberto Maturana, 36, 57
 Hume, 245
 Ilustración, 5, 48
 imagen, 19, 28, 33, 34, 35, 45, 70, 71, 72, 105, 119, 121, 129, 148, 152, 154, 175, 182, 183, 189, 192, 194, 201, 204, 228, 229, 230, 231
 imposibilidad, 32, 47, 50, 91, 123, 143
 inclusión, 148, 154, 178, 181
 incompatibilidad (inter)teórica, 6, 113
 inconmensurabilidad, 6, 107
 inexistencia, 50, 177
 infinito, 54, 148, 165, 171, 274
 información, 30, 58, 81, 153, 224, 246
 inherencia, 50
 innatismo, 60
 integración, 59, 107, 180, 221, 223
 intensidad de corriente eléctrica, 147
 interacción, 50, 52, 58, 60, 61, 64, 72, 81, 97, 100, 124, 129, 132, 133, 152, 154, 173, 179, 199, 201, 202, 203, 218, 224, 243
 intersección, 173, 181
 investigación, 6, 18, 86, 90, 99, 107, 108, 113, 123, 125, 143, 147, 153, 155, 163, 173, 186, 189, 234, 256, 260, 262
 James Clerk Maxwell, 157
 John Locke, 215
 Kant, 35, 49, 52, 56, 62, 82, 108, 242, 243, 250
 Karl M. Baer, 221
 Kepler, 39, 108, 109, 113, 114, 200, 206
 Konrad Lorenz, 51
 Kuhn, 85, 108, 109, 110, 111, 199, 250, 260
 Laudan, 85, 114, 250
 lenguaje, 18, 62, 98, 100, 101, 102, 105, 123, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 171, 172, 173, 174, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 184, 198, 203, 204, 229, 233, 234, 248, 258, 262
 ley de Coulomb, 166
 ley de desplazamiento de Wien, 127
 ley de Hubble, 115
 ley de la inercia, 219, 275
 ley de Laplace, 103
 ley de Stephan-Boltzmann, 126
 ley del desplazamiento de Wien, 128
 limitación, 50
 líneas de corriente, 153, 175
 Locke, 47, 215, 216, 217, 218, 242, 260
 Lorenz, 52, 53, 242, 256
 Ludwig Boltzmann, 157
 luminosidad solar, 126
 luz, 40, 46, 68, 109, 110, 117, 118, 119, 125, 126, 127, 158, 159, 160, 161, 163, 167, 168, 169, 177, 183, 187, 206, 226, 229, 259
 Malebranche, 47, 243, 246
 marco, 16, 100, 113, 149, 165, 166, 168, 171, 173, 174, 178, 179, 186, 201, 203, 234
 masa clásica, 112, 161, 162, 164, 165
 masa einsteiniana, 161, 162, 163, 164, 165

matemática, 19, 93, 97, 98, 99, 101, 107, 111, 117, 136, 137, 146, 148, 149, 153, 155, 157, 158, 166, 175, 179, 180, 182, 183, 204, 205, 206, 215, 226, 228, 229, 233, 234
 materia, 90, 98, 108, 116, 120, 122, 123, 124, 128, 134, 144, 146, 147, 151, 163, 164, 165, 177, 184, 195, 199, 202, 203, 204, 205, 206, 208, 209, 210, 213, 214, 215, 216, 219, 222, 223, 224, 226, 227, 230, 231, 232
 materia oscura, 116, 177
 mecanicismo, 198, 201, 202, 204, 205, 206, 209, 215, 262
 mente, 25, 31, 45, 46, 47, 60, 81, 87, 95, 100, 105, 124, 150, 194, 214, 216, 256, 261
 metáfora, 3, 6, 7, 21, 54, 71, 119, 139, 141, 148, 151, 152, 153, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 187, 189, 190, 198, 199, 201, 204, 205, 206, 209, 213, 217, 223, 224, 230, 234, 238, 258, 259
 método científico, 39, 179, 182
 métrica de Schwarzschild, 6, 113, 119, 274
 modalidad, 50, 88, 149
 modelo, 6, 39, 87, 93, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 106, 113, 115, 119, 120, 124, 125, 126, 128, 131, 134, 135, 151, 152, 153, 193, 198, 199, 206, 221, 224
 modelo analógico, 99
 modelo atómico, 129, 151
 modelo de gota líquida, 6, 128, 129, 134, 135
 modelo imaginario, 99
 modelo lógico, 99
 modelo matemático, 99, 134, 135
 modelo nuclear, 6, 128, 135
 modelo nuclear de capas, 128, 132, 134, 135
 modelo teórico, 99, 153
 momento, 55, 63, 67, 71, 73, 86, 91, 102, 106, 107, 108, 109, 116, 123, 132, 144, 145, 146, 154, 155, 157, 159, 167, 172, 178, 200, 206, 209
 movimiento, 39, 41, 83, 85, 97, 102, 108, 110, 111, 120, 128, 134, 147, 157, 158, 160, 162, 163, 164, 165, 166, 169, 176, 191, 192, 193, 197, 199, 200, 201, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 216, 217, 219, 220, 223, 224, 226, 227, 275
 movimiento browniano, 158
 mundo, 5, 6, 17, 18, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 44, 47, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 62, 63, 67, 68, 70, 71, 72, 82, 83, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 99, 102, 104, 105, 107, 108, 111, 113, 119, 120, 121, 122, 135, 137, 143, 144, 146, 147, 148, 151, 159, 170, 173, 174, 178, 179, 182, 183, 184, 187, 188, 190, 192, 193, 195, 197, 198, 199, 200, 201, 203, 204, 205, 206, 207, 209, 210, 214, 215, 217, 218, 220, 221, 228, 230, 231, 232, 234, 238, 243, 244, 259, 262
 mundo circundante, 53, 54, 67, 95, 183
 mutación, 64, 97, 261
 naturaleza, 29, 30, 46, 56, 58, 68, 71, 72, 83, 84, 85, 100, 104, 113, 124, 125, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 162, 170, 171, 175, 177, 179, 183, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 193, 194, 195, 196, 197, 201, 202, 203, 204, 208, 213, 215, 218, 224, 225, 226, 231, 232, 233, 245, 252, 258, 260, 274
 necesidad, 18, 50, 52, 58, 61, 63, 110, 162, 179, 184, 185, 197, 217
 negación, 50
 Nicholas Malebranche, 47, 48
 Niels Bohr, 121, 129, 151
 nivel operatorio, 60
 noumenon, 35, 50
 objeto, 45, 60, 61, 62, 66, 83, 96, 105, 123, 124, 125, 144, 147, 149, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 172, 175, 176, 193, 214, 220, 230, 270
 observador, 6, 42, 45, 50, 57, 63, 65, 67, 88, 90, 97, 123, 154, 165, 167, 168, 217, 254
 Oort, 116

paradigma, 5, 6, 65, 107, 121, 199, 200, 202
 paradoja de Ehrenfest, 169
 patrón estimular, 60
 Paul Henle, 171
 Paul Watzlawick, 36, 72
 pensamiento, 5, 31, 32, 36, 37, 39, 40, 42, 57, 62, 63, 84, 122, 145, 150, 165, 171, 173, 174, 180, 182, 186, 187, 193, 197, 198, 199, 206, 234, 260, 261
 percepción, 29, 30, 37, 38, 40, 45, 47, 48, 50, 53, 55, 58, 62, 66, 67, 154, 173, 183, 196, 202, 217
 Peter Higgs, 232
 phenomenon, 50
 piedra angular, 123, 234
 Platón, 37, 82, 83, 186, 193, 197, 261
 pluralidad, 50, 93
 Popper, 37, 85, 86, 113, 241, 243, 246, 250, 251, 256, 262
 posibilidad, 31, 36, 39, 50, 71, 83, 89, 105, 149, 162, 215, 218
 potencial, 44, 132, 133, 163, 174, 182, 270, 271
 potencial de Saxon-Woods, 133
 predicación, 172
 Primera ley de Newton, 219
 principio, 38, 45, 68, 120, 123, 159, 160, 162, 166, 168, 184, 186, 189, 191, 195, 197, 210, 219, 224, 226, 227, 228, 231, 232
 principio de complementariedad, 123, 231, 232
 principio de equivalencia, 168, 228
 proposición, 41, 210
 Ptolomeo, 84, 85, 113, 114, 251
 radiación térmica de Kirchhoff, 125
 radical, 65, 68, 124, 188, 242, 249
 radio de Schwarzschild, 117
 razón, 28, 30, 33, 38, 39, 40, 45, 46, 52, 58, 64, 84, 91, 97, 113, 118, 120, 150, 151, 153, 161, 169, 172, 175, 187, 189, 190, 196, 198, 200, 210, 242, 250, 251
 realidad, 5, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 42, 49, 50, 55, 57, 58, 63, 68, 70, 71, 73, 82, 83, 88, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 105, 111, 121, 122, 124, 134, 143, 144, 145, 146, 151, 153, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 183, 187, 188, 202, 230, 231, 241, 242, 244, 246, 249, 254, 260, 262
 realidad oculta, 94
 realismo, 5, 36, 82, 86, 88, 89, 114, 249
 realismo convergente, 85, 114
 referencia, 57, 58, 87, 88, 92, 100, 112, 143, 151, 160, 165, 166, 167, 168, 171, 172, 173, 174, 177, 185, 202, 203, 227
 relación, 27, 28, 29, 34, 50, 55, 56, 59, 63, 67, 70, 73, 90, 93, 95, 96, 105, 111, 112, 119, 123, 124, 127, 128, 143, 144, 149, 154, 158, 164, 167, 173, 178, 181, 182, 184, 185, 188, 194, 198, 202, 207, 211, 225, 238
 relación de indeterminación, 123
 relatividad especial, 111, 159, 248, 259
 relatividad galileana, 159, 160
 representación, 17, 38, 71, 89, 93, 98, 105, 134, 182, 198, 228, 230, 247
 res cogitans, 42
 res extensa, 42
 retroalimentación, 15, 65, 67
 Robert Brout, 232
 Santo Tomás, 45, 84, 85, 244, 252
 Santo Tomás de Aquino, 45, 84
 Schrödinger, 121, 122, 133
 Schwarzschild, 117, 120, 274
 Segunda ley, 219
 selección natural, 224, 259
 ser, 28, 31, 33, 37, 39, 41, 45, 47, 50, 52, 55, 59, 66, 67, 72, 81, 83, 84, 87, 88, 90, 97, 101, 102, 105, 109, 111, 112, 113, 117, 118, 120, 123, 124, 134, 135, 145, 150, 154, 155, 157, 158, 160, 161, 163, 165, 166, 169, 170, 172, 173, 176, 180, 182, 184, 187, 188, 189, 193, 194, 195, 197, 198, 200, 201, 202, 206, 208, 209, 213, 215, 216, 217, 218, 221, 225, 226, 228, 233, 270
 simetría, 130, 167, 232
 sistema, 6, 30, 52, 53, 57, 60, 65, 68, 69, 92, 93, 97, 98, 99, 102, 103, 109, 111, 119, 124, 151, 157, 158, 163, 170, 171, 177, 180, 193, 195, 199, 201, 203, 204, 205, 206, 221, 223, 224, 226, 231
 sistema axiomático, 99, 102, 103

sistema cognitivo, 53, 92, 93
 sistema racionomórfico, 52
 Sklar, 86, 114, 252
 subjetividad, 34
 subsistencia, 47, 50
 sujeto, 61, 63, 66, 124, 144, 197
 sustancia, 50, 186, 213
 tabula rasa, 44, 45
 temperatura, 66, 101, 102, 103, 125, 126,
 127, 128, 157, 172, 182
 tensión de cuerda, 230
 teorema, 103, 104, 152, 169, 204, 220
 teoría, 5, 6, 51, 55, 65, 67, 71, 84, 86, 87,
 93, 97, 99, 102, 103, 107, 109, 111, 113,
 114, 118, 121, 135, 146, 152, 159, 167,
 170, 171, 172, 181, 193, 201, 210, 221,
 224, 226, 227, 229, 230, 232, 233, 245,
 248, 250, 252, 255, 258, 259, 260, 261
 teoría de conjuntos, 181
 teoría de cuerdas, 229, 230
 teoría de la evolución, 71, 97, 224
 teoría de la recapitulación, 51
 teoría evolutiva del conocimiento, 51
 Tercera ley, 219
 tiempo, 39, 42, 49, 55, 60, 62, 73, 82, 98,
 101, 102, 103, 106, 110, 111, 117, 120,
 121, 126, 128, 160, 170, 172, 174, 176,
 177, 178, 180, 182, 184, 190, 195, 196,
 205, 210, 211, 212, 217, 220, 224, 225,
 227, 228, 270, 274
 totalidad, 50, 54, 58, 68, 86, 134, 186,
 189, 195, 202, 203, 208, 209, 214, 218,
 222
 Uexküll, 5, 53, 54, 55, 56, 60, 67, 244, 247
 Umwelt, 54, 243, 247
 unidad, 50, 57, 101, 126, 161, 230, 271
 universalidad, 159
 universo, 32, 39, 97, 100, 108, 111, 113,
 119, 132, 148, 165, 170, 171, 172, 175,
 179, 183, 189, 190, 191, 192, 193, 195,
 196, 197, 199, 200, 201, 202, 203, 208,
 218, 228, 238, 247
 validez, 32, 36, 82, 101, 177, 182, 183,
 210, 233
 Varela, 57, 58, 59, 69, 243, 244, 252, 256
 velocidad, 101, 102, 110, 115, 116, 117,
 123, 146, 158, 160, 163, 165, 166, 167,
 168, 169, 176, 200, 210, 211, 212, 220,
 226, 270
 verbum mentis, 45
 verdad, 32, 38, 41, 42, 43, 71, 85, 86, 87,
 88, 113, 114, 121
 Vico, 47, 244, 246
 Vollmer, 244
 Worrall, 89, 252

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.

Asimismo, 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:

$$\frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0,$$

$$\frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{00}^\lambda \frac{dx^0}{d\tau} \frac{dx^0}{d\tau} + \Gamma_{0j}^\lambda \frac{dx^0}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau} + \Gamma_{ij}^\lambda \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau} = 0$$

Sabiendo que

$$d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$dx^0 = c dt,$$

calculamos

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

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

Siendo

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

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

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

Como para los índices espaciales $\lambda = i$

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

entonces,

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

Al comprobar esta expresión con la de la mecánica newtoniana

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

obtenemos

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

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 es¹²⁵:

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

¹²⁵ 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:

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 .