

Determinismo, modelos y modalidades

Germán GUERRERO PINO

(Universidad del Valle - Colombia)

RESUMEN: El objetivo del presente escrito es doble. Por una parte, presentar y analizar la definición de determinismo clásico para sistemas cerrados desarrollada por van Fraassen. Por la otra, mostrar cierto tipo de fecundidad conceptual por parte del enfoque de espacio-de-estados, defendido por van Fraassen, frente al enfoque estructuralista –aunque ambos enfoques comparten una concepción semántica de las teorías empíricas– al arrojar nueva luz sobre un problema conceptual clásico y aún actual en la filosofía de la física: el determinismo.

ABSTRACT: This paper has two specific goals. On one hand, I show and analyze van Fraassen's definition of classical determinism for isolated systems. On the other hand, I show that van Fraassen's state-space approach of theories is more fertile than the structuralist one, even though both favour the semantic view of empirical theories. The reason is that on the first approach we can explore the concept of determinism as such and this is not possible on the latter.

1. Introducción¹

El presente escrito presenta y analiza la definición de determinismo para sistemas clásicos cerrados desarrollada por van Fraassen². Esta propuesta tiene la característica de precisar la idea intuitiva y general de que “el pasado determina el futuro”. El escrito también aborda algunos problemas relacionados con el determinismo de manera más concreta y directa; problemas tales como: cabe aplicar el adjetivo “determinista” al mundo como un todo o a algunos sistemas físicos concretos o a las teorías o a las leyes; qué entonces hay que entender por indeterminismo clásico? La discusión que lleva a la definición de determinismo está orientada principalmente por las reflexiones hechas desde la filosofía de la ciencia, especialmente las de Russell, Montague y van Fraassen. Además, la propuesta de definición presentada por van Fraassen se desarrolla en el contexto de un enfoque semántico de las teorías empíricas y a través del uso de un concepto modal como “posibilidad”³; son estos dos elementos los que considero hacen más “completa”, y por tanto interesante, a la propuesta.

Es por esto último que el objetivo del presente estudio también puede expresarse, por decirlo así, poniendo las cosas a la inversa: mostrar la fecundidad que posee la concepción semántica de las teorías, el enfoque de espacio-de-estados y no la concepción estructuralista, al arrojar nueva luz sobre problemas conceptuales –y no propiamente estructurales, que tienen que ver directamente con la estructura de las teorías empíricas– ya clásicos y aún actuales en la filosofía de la física, como por ejemplo lo es el del determinismo.

De modo que, de acuerdo con lo anterior, se comienza por presentar los aspectos principales del enfoque semántico de las teorías defendido por van

¹ Agradezco al profesor Andrés Rivadulla y a la profesora Ana Rioja de la Universidad Complutense sus valiosos comentarios y sugerencias a una versión anterior de este escrito.

² Este tipo de trabajo lo desarrolla Bas C. van Fraassen principalmente en: (1972), pp. 303-318; (1989), pp. 250-256; y (1991), pp. 21-43. Las diferencias entre estos escritos no es sustancial respecto al punto que aquí nos interesa; coinciden en lo fundamental de las ideas principales sobre el determinismo clásico que es lo que este análisis va a tener en cuenta.

³ Los orígenes de la lógica modal se remontan a Aristóteles, y el término “modalidad” se debe a la tradición lógica medieval que distinguió los *modos* en que las proposiciones podrían ser verdaderas: “necesariamente verdaderas”, “contingentemente verdaderas”, etc. De ahí que “necesariamente” y “posiblemente” sean *modos* de la verdad: *modalidades* lógicas. Además, la necesidad y la posibilidad son conceptos duales: ‘posiblemente’ significa ‘no necesariamente no’.

Fraassen, y esto porque, como ya se sugirió, la noción de determinismo se precisa a través de la noción de espacio-de-estados que precisamente es central en el enfoque semántico de las teorías defendido por van Fraassen. En segundo lugar, se trata la definición de determinismo; aquí vale la pena destacar por el momento los elementos principales que contiene la definición de determinismo propuesta por van Fraassen:

a) El carácter funcional del determinismo, propuesto por Russell.

b) La simetría de traslación del tiempo: la periodicidad en *los estados de un sistema* o el hecho de que el tiempo no influye en cómo un sistema determinista cambia. Este elemento fue destacado por Montague.

c) El determinismo en términos de *historias posibles* –trayectorias posibles, mundos posibles– de un sistema más que en función de estados actualizados del sistema. Este elemento es uno de los aspectos novedosos introducido por el mismo van Fraassen y, además, es un elemento modal dado que involucra la posibilidad.

En tercer lugar, en la parte final se discute la importancia y uso de modalidades en el contexto más general del debate entre empirismo y realismo. En este punto cabe aclarar por el momento que el elemento modal presente en la definición se encuentra en el concepto mismo de espacio-de-estados, puesto que éste no sólo involucra estados actualizados de un sistema sino también estados posibles no actualizados.

2. Concepto de teoría empírica: el enfoque semántico

2.1 Generalidades: enfoques sintáctico - axiomático y semántico

Con el propósito de comprender los elementos más característicos del enfoque semántico de las teorías empíricas considero importante comenzar por establecer sus diferencias más notorias con la noción de teoría en sentido formal (como cálculo axiomático) y con el enfoque sintáctico –axiomático de las teorías empíricas⁴. Al enfoque sintáctico –axiomático se le califica de esta manera precisamente porque concibe una teoría empírica como constituida por dos partes: una es un *cálculo axiomático no interpretado*, es decir pura sintaxis despojada de cualquier significado; y la otra es un conjunto de *reglas de correspondencia* a través de las cuales la teoría adquiere contenido empí-

⁴ Cf. Suppe (1974); van Fraassen (1970); Giere (1988); Balzer, Moulines, Sneed (1987).

rico, significado. Como bien puede deducirse, una teoría empírica no puede reducirse a sólo cálculo axiomático, es decir, pensarse como una teoría matemática formal, precisamente porque una teoría empírica habla del mundo y como tal sus componentes deben tener una significación empírica. De ahí que para los partidarios de la concepción sintáctica – axiomática la función principal de las reglas de correspondencia sea la de llenar este vacío empírico presente en un cálculo axiomático formal. Esta concepción de las teorías empíricas dominó la reflexión filosófica de la ciencia en el siglo XX hasta finales de la década de los sesenta y fue desarrollada principalmente por el empirismo lógico de Hans Reichenbach y el positivismo lógico de Rudolf Carnap.

Carnap, por ejemplo, en su texto *Fundamentos de lógica y matemáticas* (1939)⁵ ilustra claramente las dos componentes características de esta concepción para el caso de la mecánica newtoniana de partículas, la cual considera que puede reconstruirse como sigue:

1. Se toman como signos primitivos específicos algunos predicados y funtores, tales como: p, x, t, m y f.

2. Las leyes fundamentales de la mecánica se asumen como axiomas.

3. Las reglas de correspondencia establecen, por ejemplo, que: p designa la clase de partículas materiales; x la posición de una partícula en el tiempo t; m la masa de una partícula; y f la clase de las fuerzas que actúan sobre una partícula. Además se establecen otras reglas adicionales para cada concepto teórico primitivo, no observable, de modo que lo relacione con términos observables o, lo que vendría a ser equivalente, se presenta una definición operacional del concepto mismo precisando un método de medición.

Por su parte, de acuerdo con el enfoque semántico proponer una teoría es presentar una familia de modelos como candidatos para salvar los fenómenos observados⁶. El calificativo de semántico se debe fundamentalmente al hecho de que la misma formulación lingüística de la teoría pasa a un segundo plano y a que en semántica formal los términos “modelo” y “verdad” son conceptos semánticos por excelencia: son conceptos que tienen que ver con una rela-

⁵ Cf. Carnap (1939), p. 125.

⁶ “De acuerdo con la concepción semántica –plantea van Fraassen–, presentar una teoría es presentar una familia de modelos. Esta familia puede ser descrita de varios modos, mediante enunciados diferentes en lenguajes diferentes, y ninguna formulación lingüística tiene ningún estatuto privilegiado. Especialmente, no se atribuye ninguna importancia a la axiomatización como tal, e incluso la teoría puede no ser axiomatizable en ningún sentido no trivial” (van Fraassen (1989), p. 188).

ción entre mundo y teoría. Que la formulación lingüística sea secundaria significa que en una teoría entidades lingüísticas como los enunciados mismos y los actos aseverativos de los enunciados son sólo medios para expresar la teoría y, por tanto, no hacen parte de ella. Además, como veremos a continuación, el término “modelo” se emplea aquí con el sentido propio de la teoría de modelos, el cual refiere a una entidad no lingüística: un modelo es una estructura abstracta con un cierto dominio de entidades y ciertas relaciones definidas entre los elementos de este dominio.

Precisando un poco más, y de acuerdo con la formulación estándar presentada por Giere⁷, desde el punto de vista semántico de las teorías se tiene que una teoría empírica se compone de dos partes: una *definición teórica* y una *hipótesis teórica*. La definición teórica propone la clase de modelos y la hipótesis teórica (aserción empírica) plantea que algunas de las subestructuras de los modelos tienen cierta relación (identidad, aproximación o subsunción) con los fenómenos observados (la estructura determinada por los datos)⁸.

Para comprender el contenido de lo anterior debemos comenzar por aclarar qué se entiende por modelo en este contexto para luego continuar con cómo determinar la familia de modelos y finalmente aclarar lo que se quiere decir con la relación entre modelos y fenómenos. Respecto a los dos últimos puntos cabe destacar su importancia dentro del plan general propuesto. El segundo punto permitirá introducir el concepto clave de espacio-de-estados, ya que es mediante este concepto que el enfoque semántico de van Fraassen presenta la definición teórica, determina la clase de modelos. En cuanto a la relación modelos – sistemas empíricos, especificar sus principales aspectos será importante para la discusión general sobre el empleo de modalidades en las teorías empíricas, en el último apartado 4. *Consideraciones finales*.

2.2 Sobre el concepto de modelo en la ciencia

Sin pretender agotar el tema, pero sí con el deseo de desenmarañar ciertos aspectos presentes en la compleja discusión sobre los modelos en las ciencias empíricas, vale comenzar por distinguir los usos más dominantes del término. Para esto, en un principio, se tiene en cuenta la clasificación establecida por Max Black⁹ y después se precisa la manera como se emplea dicho término dentro del enfoque semántico.

⁷ Cf. Giere (1988), p. 85.

⁸ Cf. Díez, Moulines (1997), p. 332.

⁹ Cf. Black (1960).

1. Modelos a escala: son objetos reales o imaginarios que conservan las proporciones relativas de algún objeto material existente o imaginario, que se considera el original del modelo: por ejemplo, un modelo de avión en un túnel de viento.

2. Modelo analógico: es un objeto o proceso que reproduce en circunstancias distintas las relaciones presentes en el original: por ejemplo, el modelo mecánico de Maxwell y Kelvin pretende en alguna medida reproducir los fenómenos electromagnéticos o, con otro ejemplo, las relaciones entre las propiedades de la corriente eléctrica se representan a través del modelo hidrodinámico. Algo muy característico de este tipo de modelo es la duplicidad en su interpretación, ya que puede tener una interpretación ontológica –asumirse con un compromiso existencial– o una función puramente heurística¹⁰.

3. Modelo matemático: se emplea en las ciencias del comportamiento y en estadística matemática para dar una formulación matemática de un campo de investigación. Así, por ejemplo, para estudiar el crecimiento de la población se puede considerar que su variación en el tiempo depende de: número de individuos que nazcan en un cierto momento, número de los que mueran, número de los que ingresan a la región y de los que la abandonan. Aquí, a diferencia de lo que sucede en los casos anteriores y en el posterior, el modelo sería una entidad lingüística, el conjunto de ecuaciones, y no una entidad concreta o abstracta.

4. Modelos en lógica matemática: un modelo es un *sistema o estructura abstracta* $\langle D, R \rangle$ constituida por una serie de dominios básicos D , relaciones y funciones R construidas sobre estos dominios, de modo que la estructura *satisface* un conjunto de enunciados. Un modelo, así entendido, sería una entidad abstracta no lingüística.

Con el propósito de comprender los principales elementos involucrados en la anterior noción de modelo de la semántica formal, ilustremos cada uno de ellos a través de un sugestivo ejemplo visual relacionado con el teorema de Pappus¹¹. El teorema de Pappus plantea que si A, B, C son tres puntos distintos cualesquiera de la recta L , y A', B', C' tres puntos cualesquiera de otra recta M , los puntos de intersección de los pares de rectas AB' y $A'B$, AC' y $A'C$, BC' y $B'C$ respectivamente, se encuentran sobre una misma recta.

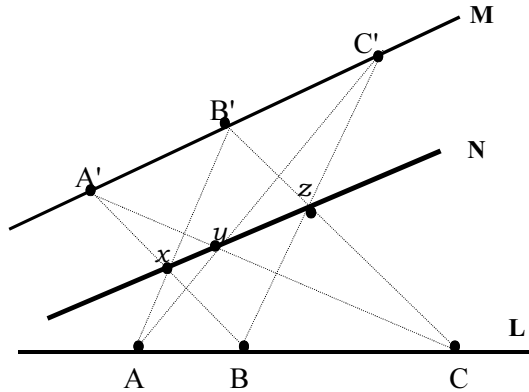
La cuestión radica en que es posible construir dos estructuras geométri-

¹⁰ Este tipo de duplicidad fue claramente expuesta y explorada por Kuhn (1962), p. 282.

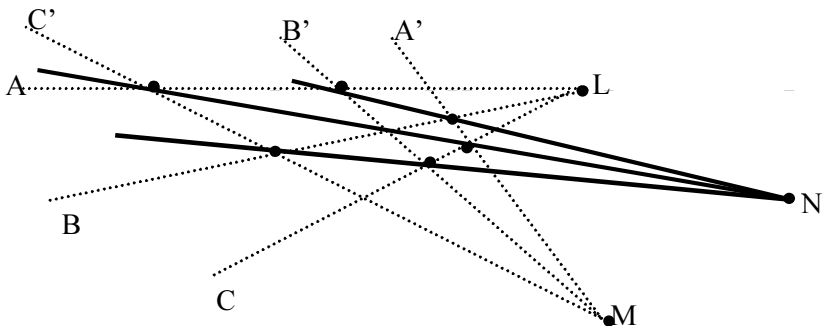
¹¹ El presente ejemplo es una adaptación del ejemplo de Nagel, Newman (1958), pp.48-49.

cas (ver las figuras que siguen) diferentes que son modelos del teorema de Pappus porque satisfacen (cumplen) su enunciado. Uno de estos modelos corresponde a una interpretación “literal” de los términos y expresiones que aparecen en el teorema, en tanto que el segundo modelo aparece por una interpretación “no literal” de los mismos: el término “punto” se interpreta como recta, “recta” como punto y así sucesivamente. Las dos estructuras difieren porque sus dominios lo hacen, pero existe una relación entre ellas: las dos estructuras son isomorfas debido a que ambas estructuras son modelos del mismo enunciado.

Interpretación “literal”



Interpretación “no literal”



5. Modelo teórico: es la expresión que más se ha generalizado para hacer referencia a los supuestos modelos de las ciencias empíricas. En términos muy generales, con ella se quiere dar a entender el tipo de representación que proporciona una teoría de una parcela del mundo. Este tipo de modelos contendría, por ejemplo, la teoría orbital del átomo de Bohr. De modo que en lo que respecta al enfoque semántico de las teorías se ha mantenido la misma expresión pero teniendo muy en cuenta que a lo que con ella se hace referencia es a modelos en el sentido de la lógica matemática; es decir, a estructuras abstractas con un cierto dominio y ciertas relaciones definidas dentro de este dominio. Nuevamente, el enfoque semántico enfatiza las entidades abstractas, los modelos, y deja en un segundo plano el aspecto lingüístico. Adicionalmente se considera que los otros tipos de modelos pueden ser mejor comprendidos si se asumen como modelos en este sentido técnico más otras características particulares de cada tipo. Así los modelos analógicos se entiende que tienen estructuras isomorfas y lo que se suele entender como el modelo del átomo de Bohr, ya que es una teoría sobre la estructura atómica, puede ser asumido como un tipo de modelos y no como un único modelo. En el mismo sentido y en relación con el empleo de las metáforas en la ciencia, se considera que más que el concepto general de metáfora contenga el de modelo en el sentido técnico presente, sucede todo lo contrario: el contenido real que pueda existir en una metáfora es aquél que puede atraparse a través de esta noción técnica.

2.3 Definición teórica

La cuestión ahora es ¿cómo una teoría presenta los modelos?; lo hace a través de una relación de caracterización o definición. Pero en lo que respecta a la forma de la definición no hay un acuerdo entre los partidarios del enfoque semántico de las teorías empíricas, aunque comparten la tesis fundamental de que las teorías son conjuntos de modelos, de estructuras abstractas. Actualmente son dos las concepciones dominantes: el estructuralismo y el enfoque de espacio-de-estados. Si bien ambas se inspiran en los trabajos pioneros de P. Suppes, de finales de la década de los cincuenta, la primera fue desarrollada en un comienzo por Stegmüller y Sneed, y actualmente viene siendo implementada por este último, Moulines y Balzer. La segunda concepción también se inspiró –además de en P. Suppes– en los trabajos de Weyl, von Neumann y el lógico holandés Evert Beth, y fue inicialmente desarrollada por van Fraassen y F. Suppe a finales de la década de los sesenta; actual-

mente la vienen implementando estos dos últimos y R. Giere.

La diferencia más sobresaliente entre los dos puntos de vista, y que será especialmente importante en el presente tema, es que en tanto el primer enfoque es extensional el segundo es modal¹². El segundo es modal porque al considerar espacio-de-estados (espacio-de-fase, en el sentido en que lo emplean los físicos) como medio para definir los modelos de una teoría, da cabida a considerar expresiones modales como necesidad y posibilidad dentro de las teorías, cosa que no es posible dentro de la concepción estructuralista.

Así pues, en lo que respecta a la manera como cada una de estas dos concepciones presenta la definición teórica de una teoría, tenemos que la forma canónica que básicamente asume el estructuralismo es la de presentar un predicado conjuntista de la forma: “ x es un modelo de la teoría ... $\text{sys}_{\text{def}} \varphi(x)$ ”, donde φ expresa principalmente las leyes de la teoría. Digo básicamente, puesto que la noción estructuralista mínima de teoría es lo que sus proponentes llaman *elemento teórico* T. El elemento teórico es una dupla $\langle K, I \rangle$, donde el núcleo K tiene una estructura compleja (que el estructuralismo describe bastante bien) que en general se puede equiparar con la definición teórica a través de un predicado conjuntista como el anterior. La otra componente I del elemento teórico, el dominio de aplicaciones intencionales, es el conjunto de sistemas empíricos a los que se pretende aplicar el núcleo; de modo que la hipótesis teórica (la aseveración empírica) expresaría cierta relación entre K e I.

A manera de ilustración, veamos la siguiente reconstrucción axiomática de la mecánica de Newton, que corresponde básicamente a la propuesta por Suppes (1957)¹³, mediante la definición de un predicado conjuntista.

Definición: x es un sistema de mecánica newtoniana de partículas sys_{def} existen P, T, s, m, f tales que:

(1) $x = \langle P, T, s, m, f \rangle$; (2), (3), (4), (5), (6) caracterizan respectivamente a P, T, s, m, f en términos matemáticos; (7) y (8) expresan respectivamente la segunda y tercera ley de Newton.

“Las estructuras que satisfacen (1)–(8) son, *por definición*, sistemas mecánicos newtonianos”¹⁴. Así, por ejemplo, dado que el sistema Tierra-Luna cumple las condiciones anteriores, se concluye entonces que este es un

¹² Cf. van Fraassen (1980), p. 92.

¹³ La ilustración se recoge de Díez, Moulines (1997), p. 335.

¹⁴ *Ibid.*, p. 336.

sistema mecánico newtoniano. Se tiene entonces que aunque éste sistema sea un sistema empírico (real) es también un modelo, una estructura abstracta que cumple la definición anterior. En otras palabras, aquí abstracto no es opuesto a empírico, sino más bien a concreto; de modo que la estructura de un sistema empírico (un sistema concreto) es abstracta¹⁵.

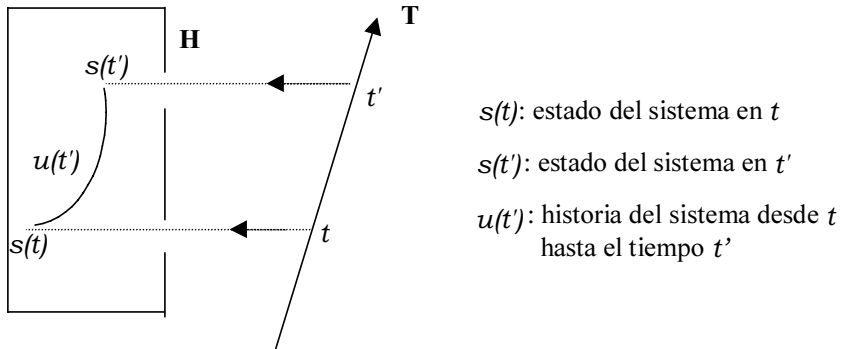
En tanto que, por su parte, la perspectiva de van Fraassen, Giere y Suppe define los modelos a través de espacio-de-estados o espacio-de-fase. Veamos esto con mayor detenimiento. Para comenzar, en la física clásica se entiende que un sistema físico puede tener ciertos estados y que el estado del sistema en un tiempo dado está caracterizado por ciertas magnitudes físicas (observables) relacionadas con el sistema, las cuales pueden tomar ciertos valores. Si lo anterior vale también para la mecánica cuántica, es una cuestión de interpretación que dejaremos de lado ya que aquí sólo estamos interesados en sistemas clásicos y aislados.

Veamos dos ejemplos para fijar lo anterior. En la mecánica newtoniana las magnitudes físicas son la posición y el momento, que en coordenadas generalizadas se representan por $q = (q_x, q_y, q_z)$ y $p = (p_x, p_y, p_z)$ respectivamente, de tal manera que el estado de cada partícula en un instante determinado se puede identificar con el séxtuplo ordenado $\langle q_x, q_y, q_z, p_x, p_y, p_z \rangle$. En termodinámica las variables de estado de un gas son volumen (v), presión (p) y temperatura (t), y su estado será la triada $\langle v, p, t \rangle$. Así entonces, los estados quedan identificados en general por puntos en un determinado sistema de coordenadas, el espacio de estados posibles (*state-space*), de tantas dimensiones como variables de estado se tengan: hexadimensional en el primer caso y tridimensional en el segundo.

De modo que la representación de un sistema clásico consiste en presentar la evolución del sistema en el tiempo, es decir, la historia del sistema. Pero la representación de la historia de un sistema corresponde a una trayectoria $u(t')$ en su espacio de estados posibles (*espacio-de-estados*) \mathbf{H} , trayectoria determinada principalmente por las leyes de la teoría (ver la siguiente ilustración¹⁶). Además cada una de tales trayectorias del espacio-de-estados es esencialmente una función s del tiempo \mathbf{T} (el continuo de los números reales) a un espacio-de-estados \mathbf{H} ; es decir, $s: \mathbf{T} \rightarrow \mathbf{H}$.

¹⁵ Que esto es así para el estructuralismo se puede ver en Balzer, Moulines, Sneed (1987), p. 2.

¹⁶ Cf. van Fraassen (1991), p. 27.



Apliquemos las ideas anteriores al caso del oscilador armónico simple a través de las ecuaciones canónicas del movimiento o ecuaciones de Hamilton:

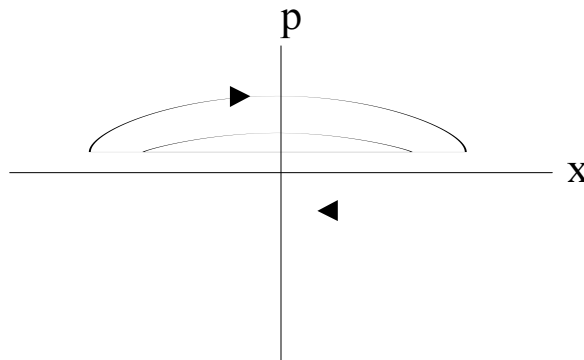
$$(1) \dot{q}_i = \delta H / \delta p_i$$

$$(2) \dot{p}_i = - \delta H / \delta q_i$$

las cuales permiten describir gráficamente los posibles movimientos del sistema. Esto se consigue representando el movimiento como una función en un espacio de $2n$ dimensiones cuyos ejes de coordenadas corresponden a las q_n y las p_n .

Para sistemas conservativos, como el que nos ocupa, el hamiltoniano no depende del tiempo y expresa la constancia de la energía del sistema; es decir, $H = T + V = \text{constante}$, donde H es la energía total del sistema, T la energía cinética y V la energía potencial. En el caso del oscilador armónico simple que se mueve en una sola dimensión se cumple entonces que

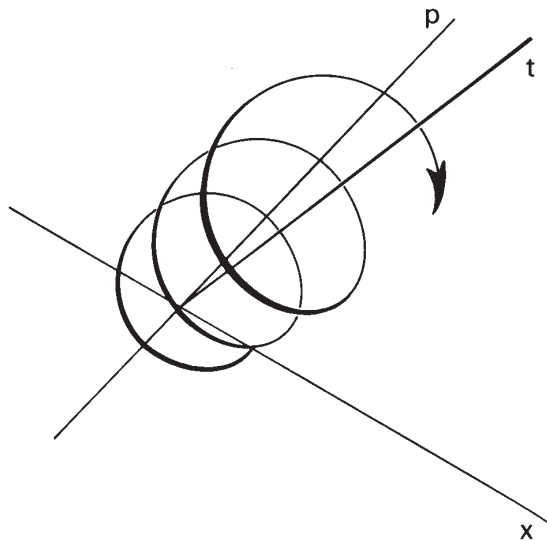
$$H = (k/2) x^2 + (1/2m) p^2 = \text{constante}$$



Así que los movimientos en el espacio de fases tienen lugar en las curvas definidas por la ecuación anterior, o sea sobre elipses (ver la figura anterior). El que dicho movimiento sea sobre una u otra de las trayectorias depende de las condiciones iniciales del sistema.

Además es posible representar la evolución del sistema en el tiempo a través de lo que los físicos llaman propiamente el espacio de los estados, que se obtiene adicionando un tercer eje, el del tiempo, perpendicular al plano $x - p$. De modo que el estado del sistema como función del tiempo se representa mediante una espiral elíptica que se mueve a lo largo del eje t , como se muestra en la figura.

En síntesis, las ideas clave que hay que retener para lo que sigue son: una teoría se asume básicamente como un conjunto de modelos y dicho conjunto equivale (de acuerdo con van Fraassen) a las trayectorias posibles de un sistema físico en el espacio-de-estados.



3. Definición de determinismo

Como quedó expresado desde el principio, el procedimiento para llegar a una definición de determinismo consta principalmente de tres etapas: la primera tiene que ver con la condición de dependencia funcional, la propuesta de definición de Russell que da un carácter funcional en sentido matemático al determinismo; la segunda, la condición de periodicidad expresada por Montague, representa el carácter periódico del tiempo contenido en el deter-

minismo; y la tercera está relacionada con la condición de modalidad introducida por van Fraassen, que no hace referencia a *estados* de un sistema físico sino a *historias posibles* de un sistema. De modo que su propuesta final involucra estas tres condiciones

3.1. Condición de dependencia funcional

Bertrand Russell con el propósito de precisar aquella idea básica en el determinismo de que “el pasado determina el futuro”, en su escrito *On the notion of cause with applications to the free will problem*, propone como definición: un sistema es determinista exactamente si sus estados previos determinan sus estados posteriores, en el exacto sentido en que el argumento de una función determina sus valores¹⁷.

Para comenzar son dos los elementos a destacar en esta definición: el que se hable de sistemas y de una dependencia funcional. Respecto al primer elemento es necesario aclarar la manera como éste va a ser empleado en lo que sigue. Siendo consecuentes con el enfoque de teoría empírica presentado en el numeral anterior, vemos que si queremos responder a si un sistema físico real particular –o, si se es algo más pretencioso, el mundo en su totalidad– es determinista debemos comenzar por referir nuestra pregunta a los sistemas o modelos que una teoría concreta propone para después determinar en qué medida dicho calificativo puede hacerse extensivo a otros ámbitos. Este será entonces el camino que seguiremos aunque Russell pretenda que su definición sea aplicada a sistemas empíricos concretos.

Con esta aclaración, las dificultades por el momento se concentran entonces en el carácter funcional del determinismo. Puesto que en una función de la forma $y = f(x)$ el argumento de la función es x y el valor de la función es y , en la definición anterior debemos entender que “sus estados previos” se equipara con x y “su estado posterior” con y . Por otra parte, y de acuerdo con lo que se dijo anteriormente sobre espacio-de-estados, podemos decir que un sistema S dado tiene una familia de estados posibles y que el sistema tiene uno de tales estados en cada instante t durante su existencia, lo cual en términos formales se escribe así: $s(t)$ representa el estado del sistema S en el tiempo t . Como $s(t)$ es una función y t , el argumento de la función, representa instantes de tiempo, entonces los valores de la función representan estados posibles de S .

¹⁷ Cf. Russell (1953), pp. 396-398.

Así que cualquiera de estas funciones describe una *trayectoria* del sistema en el espacio de sus posibles estados, pero s es la función que describe la trayectoria que S *actualmente* sigue. En estos términos, la propuesta de Russell quedaría así: un sistema es determinista si *el estado* en el tiempo $t + b$ está determinado unívocamente dados (los argumentos de la función) *el estado* $s(t)$ en el tiempo previo t , el tiempo t y la amplitud b del intervalo de tiempo.

En términos formales, S es determinista exactamente si:

- (1)¹⁸ Hay una función f tal que, para todo tiempo t y número positivo b ,
- $$s(t + b) = f(s(t), t, b)$$

donde $s(t)$ y $s(t + b)$ representan *estados* del sistema en los tiempos t y $t + b$ respectivamente.

En este punto van Fraassen hace notar que en (1) la variable tiempo t aparece como variable independiente, lo cual es una cuestión problemática en la definición porque la condición la satisface trivialmente todo sistema puesto que se ha partido de que s es una función y así $s(t + b)$ está unívocamente determinado al sólo dar los números t y b .

De modo que si bien la intención inicial de Russell era legítima, puesto que buscaba determinar lo que sería posible en un sistema determinista en términos de lo que le ha pasado alguna vez al mismo, la conclusión final a la que llegó no es satisfactoria.

3.2 Condición de periodicidad

Teniendo muy presente lo anterior, el camino a seguir consiste en mejorar (1) de modo que dicha mejora no sea vacua. La propuesta de van Fraassen, inspirado especialmente en el trabajo de Montague, consiste en hacer que los estados posteriores no dependan del tiempo, esto es:

- (2)¹⁹ Hay una función f tal que para todo tiempo t y número positivo b ,
- $$s(t + b) = f(s(t), b)$$

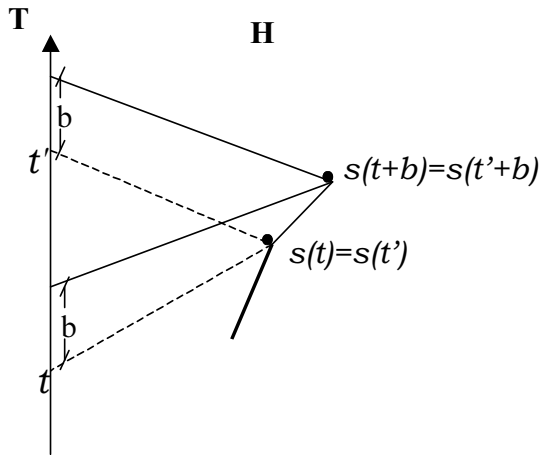
Como bien puede observarse, aquí f no depende de t , y esto significa que la función f es invariante respecto al tiempo; es decir invariante respecto a, por ejemplo, la sustitución de t por $t + b$. La función describe una cierta periodicidad en *la historia actual* del sistema S . Esto se puede evidenciar mejor transformando (2) en su equivalente

¹⁸ Cf. van Fraassen (1989), p. 252.

¹⁹ *Ibid.*

(2A)²⁰ Para todo tiempo t, t' , si $s(t) = s(t')$ entonces $s(t + b) = s(t' + b)$

La figura que sigue recoge mi interpretación de la situación expresada mediante (2A). Como puede observarse, el tiempo como tal no hace diferencia en cómo el sistema cambia: el comportamiento del sistema entre t y $t+b$ es el mismo que entre t' y $t'+b$. En otras palabras, el comportamiento de un sistema observado hoy es el mismo que su comportamiento mañana o en cualquier otro instante, con tal que el sistema se ponga en marcha bajo las mismas condiciones iniciales. Este tipo de periodicidad es una clase de simetría en el tiempo, es una simetría bajo la traslación del tiempo de la forma: $t \rightarrow t + x$.



Pero van Fraassen plantea que esta solución tiene dos tipos de inconveniente. El primer inconveniente radica en que la simetría que se propone está limitada a *la historia actual* del sistema en consideración, pero realmente es importante tener en cuenta que el sistema puede tener otros *estados posibles* diferentes, incluyendo aquellos que nunca serán actualizados. El segundo inconveniente consiste en que aquella idea del determinismo de que la evolución del sistema no debe depender del tiempo en absoluto, no sólo debería aplicarse a la historia actual sino también a sus otras *trayectorias posibles*. En definitiva, la definición es limitada al concentrarse en la historia actual. van Fraassen supera esta limitación dando cabida, como se ha insistido desde un comienzo, a un tipo de modalidad como las trayectorias posibles.

²⁰ *Ibid.*

3.3 Condición de modalidad

De acuerdo con lo anterior, van Fraassen comienza por plantear que “decir que el pasado determina el futuro no significa que los cambios actuales caen bajo un cierto patrón sino sólo que ciertas posibilidades están abiertas para el sistema”²¹, de modo que con este punto de partida propone modificar (1) mínimamente así²²:

- (3) Para todo tiempo t , todo número positivo b y toda *trayectoria posible* u ,
hay una función f tal que $u(t + b) = f(u(t), t, b)$

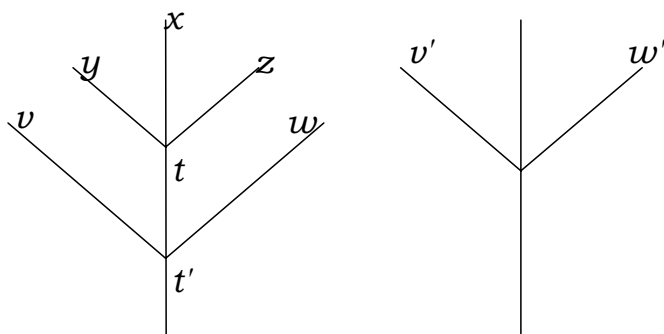
En (3) no se habla ya de un estado actualizado o de una historia actual, sino de trayectorias posibles que incluyen estados no actualizados.

Otro modo de expresar esto es:

- (3A) Para todo tiempo t , todo tiempo t' posterior a t y *trayectorias posibles* u y v ,

$$\text{si } u(t) = v(t), \text{ entonces } u(t') = v(t')$$

Para comprender mejor el contenido de (3A) veamos primero la noción de mundos equivalentes en un cierto tiempo t ²³. Los mundos x y y (ver figura) son equivalentes en el tiempo t , lo cual abreviamos como “ x y y son *mundos equivalente- t* ”, exactamente si ellos tienen la misma historia en el tiempo t ; es decir, si x y y comparten el pasado y el presente respecto a t . Los mundos equivalente- t a x definen un mismo *cono de futuro* en t , tal y como puede apreciarse en la figura: los mundos y, x, z pertenecen al cono- t de x ; los mundos v, w pertenecen al cono- t' de x ; y los mundos v', w' no comparten historia con x , no pertenecen a ninguno de los dos conos anteriores (cono- t y cono- t').

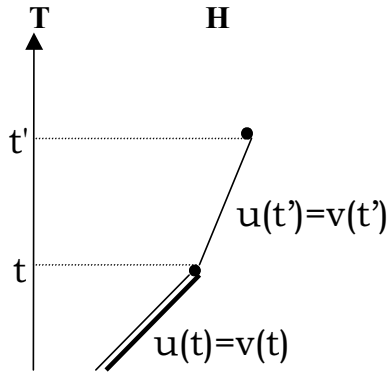


²¹ *Ibid.*, p. 253.

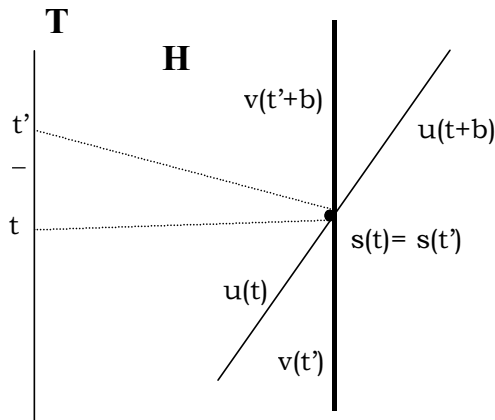
²² *Ibid.*

²³ Esta noción se encuentra desarrollada en detalle en van Fraassen (1989), pp. 74-75.

De modo que la condición (3A) la interpreto gráficamente como sigue:



Pero aquí también aparecen dificultades. La primera es que a (3) le falta la periodicidad de (2) porque (3) permite que el sistema pueda tener el mismo estado en dos ocasiones pero evolucionando diferentemente desde este, como puede apreciarse en la figura que sigue; es decir, es posible que $s(t) = s(t')$ aunque $u(t + b) \neq v(t' + b)$, porque puede darse el caso que $u(t) \neq v(t')$ y $s(t) = s(t')$.



En otras palabras, de acuerdo con (3A), se tiene que el tiempo como tal aparece y produce una diferencia en la evolución del sistema, puesto que si dos historias son diferentes en un cierto tiempo seguirán siéndolo en cualquier tiempo posterior (como se aprecia en la figura). Esto último nos permite expresar el criterio básico de determinismo (o indeterminismo) para sistemas cerrados –criterio ya advertido desde el principio mismo de la discusión–

en los siguientes términos: si el sistema adquiere en dos ocasiones el mismo estado, las evoluciones posteriores del sistema deben ser las mismas. Además, el sistema será indeterminista en caso contrario; es decir, si el mismo estado se detiene en dos ocasiones, el sistema evoluciona sin embargo de dos modos diferentes²⁴.

Pero por otra parte, llegamos así a dos puntos clave relacionados con la falta de periodicidad en (3). El primero es que esta falta de periodicidad se constituye en un defecto porque de no haber periodicidad habría que concluir que el tiempo mismo tiene una influencia causal sobre el sistema (el sistema no estaría aislado, estaría siendo interferido), y con esto nos enfrentaríamos a un dilema: o bien cada una de estas interferencias debería describirse como un aspecto del estado o bien debería considerarse el sistema en sí mismo indeterminista, como si su futuro no estuviera determinado por su pasado. En cualquier caso, aquí nos encontramos con cierta ambigüedad en la noción de determinismo difícil de superar. En definitiva, debemos concluir, plantea van Fraassen, que si el estado de un sistema no determina sus subsecuentes estados puede ser porque o bien un elemento de *pura casualidad* está en su evolución o bien porque algún otro factor está involucrado. De nuevo, en el presente contexto, en el cual se considera que el sistema está aislado, los dos casos conducen a lo mismo: caracterizar al sistema como no determinista.

La segunda dificultad concierne a la relación de historias posibles vía un único tiempo (ver la figura anterior que representa mundos que no comparten un cono de futuro). De acuerdo con van Fraassen no existe un criterio de simultaneidad que permita relacionar eventos posibles que pasan en diferentes mundos posibles; no se cuenta con un tiempo absoluto, o algo por estilo, para relacionar este tipo de eventos. Dada esta condición, entonces se podría describir una historia alternativa a la historia actual usando su propio calendario. Esto permitiría entonces realizar una reasignación del tiempo $t = 0$ en la historia alternativa; es decir, en la descripción de historias, actuales o posibles, podemos permitir reiniciar los relojes y calendarios arbitrariamente.

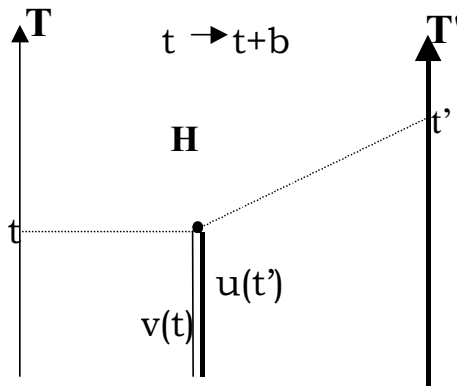
Con las dos observaciones anteriores y con objeto de superar la falta de

²⁴ Si bien estamos circunscritos a sistemas clásicos y cerrados con objeto, entre otras cosas, de sentar los conceptos básicos para un análisis más juicioso, cosa que no se va hacer aquí desde luego, del determinismo o indeterminismo en la mecánica cuántica, considero que esta idea coincide con la esencia del indeterminismo cuántico: sistemas preparados idénticamente y con la máxima exactitud por el esquema teórico, cuando se someten a medidas idénticas, pueden en general dar resultados diferentes.

periodicidad en la última definición, van Fraassen adelanta la siguiente definición:

(4)²⁵ Si u es una *trayectoria posible* y v es definible por la ecuación $v(t) = u(t + b)$, donde b es un número real, entonces v es también una *trayectoria posible*.

Esta definición la interpreto mediante la figura siguiente, en donde desde luego que u y v son descripciones equivalentes de lo que pasa en términos de relojes diferentes (\mathbf{T} y \mathbf{T}'); además la ventaja de esta relación (4) está en que contiene la periodicidad que le hace falta a (3). Esta definición representa, en el lenguaje de la semántica de mundos posibles, la relación de accesibilidad entre mundos posibles; relación que en un contexto físico puede entenderse como la relación entre, por ejemplo, el tiempo medido por relojes astronómicos y el medido por relojes atómicos²⁶.



De modo que van Fraassen a partir de (3) y (4) expresa finalmente lo que considera sería una definición satisfactoria de un sistema determinista:

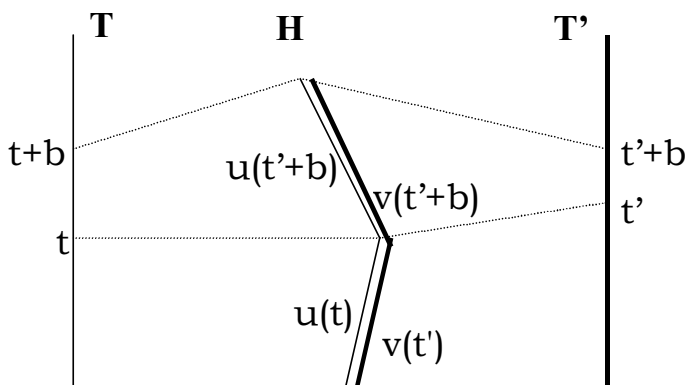
(4A)²⁷ Si u y v son historias posibles y $u(t) = v(t')$ entonces para todo número positivo b , $u(t + b) = v(t' + b)$

Es claro que $u(t) = v(t')$ indica, como se hizo notar antes, que se tienen dos descripciones equivalentes pero en términos de relojes diferentes, tal como se observa en la figura (la interpretación que hago de 4A). De modo que este tipo de traslación del tiempo, presente en (4A), induce una simetría que imparte periodicidad tanto a cada trayectoria individual como también a

²⁵ Cf. van Fraassen 1989, p. 254.

²⁶ Cf. van Fraassen 1972, pp. 315-316.

²⁷ Cf. van Fraassen 1989, p. 255.



las trayectorias relacionadas entre sí. En síntesis, (4A) efectivamente combina la condición de dependencia funcional (2) y la condición de periodicidad (3) en una única condición bajo la perspectiva de **historias posibles**, en donde especialmente se cumple que *el mismo estado, realizado dos veces, es seguido por los mismos cambios*.

Finalmente, en el tema del determinismo también existe la noción fuerte de bi-determinismo, que viene a decir adicionalmente que “el pasado debió también haber sido como el presente es ahora”. Una definición de bi-determinismo sería equivalente a (4A) en donde no se restrinja a b sólo a valores positivos sino a cualquier número real.

4. Consideraciones finales

Primera consideración. Llegados a este punto es necesario ahondar un poco más en la justificación del empleo de historias posibles (el elemento modal que desde un comienzo se advirtió), puesto que es fácil apreciar cierta simplicidad en (2) respecto a (4), sin desconocer que (2) contiene la enmienda simple a la expresión (1) de Russell. Con otras palabras, la cuestión es: por qué no quedarnos en la consideración de estados actuales y evitamos hablar de estados posibles (incluyendo aquellos que nunca se actualizarán)?

van Fraassen explora un simple y atractivo contraejemplo presentado por Montague en *Deterministic Theories* (1962), el cual muestra que (2) no captura completamente nuestra idea de determinismo. Montague propone que un sistema que evoluciona de tal modo que cada uno de sus estados es diferen-

te de todos los demás estados posibles, cumple vacuamente (2), pero lo cierto es que este sistema no se ajusta a nuestra idea intuitiva de determinismo. Por tanto, van Fraassen ilustra esta tipo de sistemas con los átomos de Lucrecio, cuya peculiaridad es que nunca echan marcha atrás durante su camino. El universo de Lucrecio consta de átomos indivisibles que se mueven continua y previsiblemente, excepto por los desvíos bruscos, ocasionales y espontáneos que tienen²⁸.

La cuestión es que si uno de estos átomos se mueve durante toda la eternidad en la misma dirección y desviándose un poco de tiempo en tiempo de esta dirección, de estas consideraciones no se sigue que este sistema sea determinista; pero esto precisamente es lo que se concluye a partir de la definición (2) [Para todo t y t' , si $s(t) = s(t')$ entonces $s(t + b) = s(t' + b)$], ya que el antecedente se cumple vacuamente.

Veamos esto en detalle. Describamos el estado del átomo de Lucrecio en términos únicamente de coordenadas espaciales: $s(t)$ es la coordenada de posición del átomo a lo largo de la línea. Así que para el átomo se tiene: si $t \neq t'$ entonces $s(t) \neq s(t')$. De modo que se satisface vacuamente la condición (2) justamente porque el átomo nunca tiene el mismo estado dos veces. Pero, como se dijo al comienzo, toda definición que haga determinista el átomo lucreciano es definitivamente defectuosa; así pues, para van Fraassen una definición de determinismo realmente necesita pagar el precio de tener en cuenta seriamente las posibilidades.

Segunda consideración. Recojamos ahora la pregunta que se planteó inicialmente: ¿qué tipo de entidades cabe calificar de deterministas? van Fraassen responde a esta pregunta en los siguientes términos: la aparente cuestión *factual* sobre el determinismo en un caso individual tiene que ser dividida en una cuestión lógica y una cuestión de clasificación. En otras palabras, bajo la concepción semántica de las teorías la cuestión radica en que en vez de decir que un sistema dado es determinista, debería decirse que este sistema pertenece a una clase determinista.

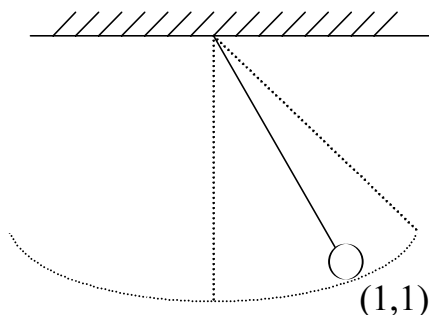
²⁸ Lucrecio, por ejemplo, dice: “cuando los átomos caen en línea recta hacia abajo, a través del espacio vacío por su propio peso, en tiempos y lugares completamente indeterminados, ellos siempre desvían bruscamente un poco de su dirección, exactamente tanto que usted puede llamar a esto un cambio de dirección. De no ser por estas desviaciones bruscas, las cosas caerían como gotas de lluvia a través del abismo del espacio. Ninguna colisión tendría lugar y ningún impacto entre átomos se produciría. En esta naturaleza nunca se crearía nada” (Tomado de van Fraassen (1989), p. 251).

Así, entonces, el aspecto lógico consiste en que la atribución de determinismo pertenece en primera instancia a una clase de sistemas, modelos, la cual no puede señalarse a la manera de un sistema real individual sino que ha de ser determinada –como ya hemos planteado– listando el conjunto de estados posibles y el conjunto de historias posibles (trayectorias). De modo que una vez definida la clase de sistemas –por ejemplo, sistema mecánico newtoniano– la cuestión del determinismo para esta clase queda lógicamente resuelta a través de la expresión (4A); es decir, comprobando que la clase de sistemas cumple con esta condición. Por tanto, la cuestión contingente o empírica de clasificación consistiría sólo en determinar si la conducta observable de un sistema empírico dado se ajusta a lo que es lógicamente posible para esta clase.

Pero entonces, si el peso del determinismo recae principalmente en la definición teórica de los modelos y puesto que las clases pueden ser subclases de otras clases, se tiene que un sistema real particular puede también pertenecer a una clase que no sea determinista. Así pues, la cuestión de si un sistema real dado es determinista no es después de todo una cuestión definitivamente unívoca.

Veamos un ejemplo, propuesto por van Fraassen, para ilustrar las ideas anteriores, especialmente la que plantea que el determinismo puede ser completamente ambiguo en ciertos casos. Consideremos un péndulo como el de la figura y describamos su estado $s(t)$ únicamente en términos de la posición s en el plano que contiene su trayectoria durante su movimiento.

Supongamos además que el péndulo siempre logra una misma posición en cierto periodo; sea esta posición las coordenadas $(1,1)$, de tal manera que, por ejemplo, $s(5) = (1,1)$ y $s(25) = (1,1)$. Pero de estas consideraciones no se concluye necesariamente que, por ejemplo, $s(16) = s(26)$, puesto que no se sabe si los dos movimientos tienen la misma dirección en estos dos tiempos. En otras palabras, una vez caracterizado el sistema únicamente a través de las



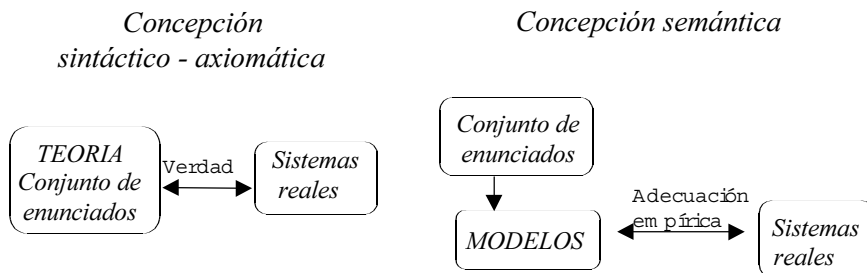
posiciones en el tiempo, el sistema es indeterminista; pero si vamos a una caracterización diferente de su conjunto de estados, por ejemplo la que considera como parámetros de estado la posición y la cantidad de movimiento, podemos encontrar que bajo esta nueva caracterización el sistema es determinista.

La tercera y última consideración tiene que ver con cómo asume van Fraassen las modalidades dentro de la actividad científica. En este punto se quiere destacar principalmente la forma como van Fraassen armoniza el empirismo constructivo que profesa con la admisión y función del discurso modal en la ciencia. Para esto debemos comenzar por precisar en qué consiste el empirismo constructivo recogiendo los elementos principales del enfoque semántico de las teorías empíricas.

Como ya se había dicho, en la concepción semántica de las teorías la segunda componente de una teoría es la hipótesis teórica, esto es así sobre todo en el enfoque de espacio-de-estados, que es el que estamos aquí implementando. La hipótesis teórica tiene que ver con la relación general entre mundo y teoría, y por tanto esta plantea que los modelos construidos a partir de los datos de los fenómenos, los sistemas empíricos reales, tienen cierta relación con alguna de las subestructuras de los modelos definidos a través de las leyes. En general, esta relación puede ser de identidad (van Fraassen) o aproximación (Giere).

El esquema que sigue presenta un paralelo entre la concepción sintáctica – axiomática de las teorías y la semántica en lo que respecta a la relación de representación entre teoría y realidad²⁹.

Relación representacional entre teoría y realidad



²⁹ El esquema se recoge parcialmente de Giere (1988), p. 83.

Teniendo presente que la función básica de una categoría semántica es la de establecer una relación entre una teoría y el mundo, podemos ver que en el esquema de la izquierda la relación se presenta directamente entre enunciados y mundo; es decir, a través de la categoría semántica *verdad*. Mientras que en el esquema de la parte derecha, en la concepción semántica, la categoría semántica pertinente es la de adecuación empírica, que es una relación entre un objeto abstracto, un modelo teórico, y un sistema empírico real (o conjunto de sistemas empíricos).

Con los elementos anteriores queda más fácil precisar el tipo de empirismo que van Fraassen defiende: él llama a su punto de vista *empirismo constructivo* en la medida en que “concibe la actividad científica más como una construcción que como un descubrimiento: construcción de modelos que deben ser adecuados a los fenómenos, y no descubrimiento de la verdad respecto de lo inobservable”³⁰. Pero el empirismo no es el único punto de vista que se puede defender desde el enfoque semántico de las teorías, también es posible comprometerse con cierto tipo de realismo. Este es el caso, por ejemplo, de R. Giere quien, con sus propios términos, adhiere a un realismo constructivo según el cual: “las hipótesis teóricas se interpretan como aquellas que afirman una semejanza entre un sistema real y algunos, aunque no necesariamente todos, de los aspectos de un modelo”³¹.

De modo que aún dentro de la concepción semántica se presenta la disputa filosófica entre realismo y empirismo, ya que es posible adquirir diferentes tipos de compromisos epistemológicos respecto a las componentes que proporcionan los modelos teóricos: para el empirista el compromiso es de adecuación empírica entre los sistemas reales y ciertas subestructuras teóricas, en tanto que el realista está dispuesto a aceptar que más allá de esta adecuación existen elementos de los modelos teóricos que se corresponden con partes de la realidad.

Se renueva así, de esta forma, y entre otras cosas, el debate sobre la realidad de los *no-observables*, pues el realista en algunos casos está dispuesto a comprometerse con entidades de este tipo, mientras que el empirista en estas cuestiones no va más allá de lo que es “observable” y califica las reificaciones del realismo como metafísica. La discusión sobre las modalidades guarda bastante similitud en forma con el debate de los *no-observables*. Lo importante a destacar en este momento es que van Fraassen defiende un

³⁰ van Fraassen 1980, p. 20.

³¹ Giere (1988), p. 97.

empirismo constructivo que es aplicable en ambos dominios; en tanto que, por ejemplo, R. Giere asume un realismo constructivo también en las dos dimensiones: por una parte, reifica algunos inobservables y, por otra, también reifica algunos aspectos de los modelos (como las posibilidades) al interpretarlos en términos causales.

Ahora bien, es claro que de entrada se detecta una cierta tensión a la hora de armonizar las modalidades con un empirismo; pero la clave se encuentra precisamente en comprender que de acuerdo con el empirismo la posibilidad, por ejemplo, se aplica solamente a los modelos teóricos y no a los acontecimientos físicos (sistemas empíricos) como tales. Esto no quiere decir que las modalidades deban ser excluidas del análisis de las teorías empíricas, como hizo el empirismo moderno, sino que más bien este análisis permite determinar su función: las modalidades hay que tenerlas en cuenta en el discurso científico, en los modelos propuestos por las teorías, pero están ausentes en la descripción científica del mundo y no les corresponde una realidad. “La modalidad aparece en la ciencia –comenta van Fraassen– debido únicamente a que el lenguaje naturalmente utilizado una vez que una teoría ha sido aceptada, es un lenguaje modal. Esto traslada el problema al seno de la filosofía del lenguaje, ya que se transforma en el problema de explicar el uso y la estructura del lenguaje modal”³².

En tanto que un realista constructivo como Giere, vincula estrechamente la modalidad con la causalidad, pues considera que cuando menos algunos aspectos de la causalidad se relacionan con la estructura modal de los modelos científicos. En pocas palabras, el realismo modal pretende que en algunos casos puede existir en la naturaleza una contrapartida causal de la estructura modal de los modelos teóricos, mientras que para el empirista estos elementos modales no son inherentes a los sistemas reales sino que existen simplemente en los modelos.

Para finalizar, hemos visto cómo van Fraassen armoniza una noción de determinismo para clases de sistemas aislados, teniendo en cuenta las historias posibles de dichos sistemas, con una posición filosófica empirista, sin necesidad de reificar entidades como los mundos posibles no realizados o los estados posibles no actualizados. Esto, en las propias palabras de van Fraassen, “así concebido, no es muy grande el precio por tomar en serio las posibilidades y las necesidades. Esto quiere decir que, después de todo, no se ha dejado entrar a la metafísica nociva por la puerta trasera”³³.

³² van Fraassen 1980, p. 241.

³³ van Fraassen 1989, p. 257.

Referencias Bibliográficas

- Balzer, W., Moulines, C. U. y Sneed, J. (1987): *An Architectonic for Science. The Structuralist Program*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.
- Black, M. (1960): “Modelos y Arquetipos”, en M. Black, *Modelos y Metáforas*, Madrid, Tecnos, 1966.
- Carnap, R. (1939): *Fundamentos de Lógica y Matemáticas*, Madrid, Taller de Ediciones Josefina Betancor, 1975.
- Díez, J. A. y Moulines, C. U. (1997): *Fundamentos de filosofía de la ciencia*, Barcelona, Ariel.
- Giere, R. N. (1988): *Explaining Science. A Cognitive Approach*, Chicago, University of Chicago Press.
- Kuhn, T. S. (1962): *La estructura de las revoluciones científicas*, México, Fondo de cultura económica, 1983.
- Nagel, E. y Newman, J. R. (1958): “La prueba de Gödel”, *Cuaderno 6*, Centro de estudios filosóficos, UNAM, 1959.
- Russell, B. (1953): “On the notion of cause with applications to the free will problem”, en H. Feigl and M. Brodbeck, *Readings in the philosophy of science*, New York, Appleton-Century-Crofts, 1953.
- Suppe, F. (1974): “En busca de una comprensión filosófica de las teorías científicas”, en F. Suppe (Comp.), *La estructura de las teorías científicas*, trad. cast. P. Castillo y E. Rada, Madrid, Nacional, 1979.
- van Fraassen, Bas. C. (1970): “On the extension of Beth’s semantics of physical theories”, *Philosophy of Science*, 1970, pp. 325-339.
- van Fraassen, Bas. C. (1972): “A Formal Approach to the Philosophy of Science”, en R. Colodny (ed.), en *Paradigms and Paradoxes: the philosophical challenge of the quantum domain*, Pittsburgh, University of Pittsburg Press, 1972, pp. 303-366.
- van Fraassen, Bas. C. (1980): *La imagen científica*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.
- van Fraassen, Bas. C. (1989): *Laws and Symmetry*, New York, Oxford University Press Inc.
- van Fraassen, Bas. C. (1991): *Quantum Mechanics: An empiricist view*, New York, Oxford University Press Inc.