

ArtefaCToS. Revista de estudios de la ciencia y la tecnología

eISSN: 1989-3612

Vol. 7, No. 1 (2018), 2ª Época, 29-50

DOI: <http://dx.doi.org/10.14201/art2018712950>

## El problema de la irreversibilidad: Una relación inter-teórica de dos niveles

### *The Irreversibility Problem: A Two-Level Interteoretical Relation*

Juan Camilo MARTÍNEZ GONZÁLEZ\*; Olimpia LOMBARDI\*\*

CONICET-Universidad de Buenos Aires, Argentina

\*olimac62@hotmail.com

\*\*olimpiafilo@gmail.com

Recibido: 06/01/2018. Revisado: 18/01/2018. Aceptado: 20/01/2018

#### **Resumen**

El objetivo del presente trabajo consiste en arrojar nueva luz sobre el problema de la irreversibilidad, señalando que en las discusiones sobre el tema no se ha tomado en cuenta suficientemente que la relación entre termodinámica y mecánica involucra relaciones teóricas en dos niveles: un nivel intra-teórico y un nivel inter-teórico. Intentaremos poner de manifiesto los dos pasos necesarios para establecer el vínculo entre irreversibilidad termodinámica y reversibilidad mecánica: el primer paso consiste en explicar la relación intra-teórica entre macro-irreversibilidad y micro-reversibilidad en el marco mecánico; el segundo paso es establecer la relación inter-teórica entre la irreversibilidad termodinámica expresada por el segundo principio y la macro-irreversibilidad obtenida en el primer paso. Finalmente, se discutirán las posibles interpretaciones de estos dos pasos desde diferentes posturas filosóficas.

**Palabras clave:** emergencia; reducción; pluralismo; termodinámica; mecánica estadística; relaciones interteóricas.

### Abstract

*The purpose of this paper is to shed new light on the problem of irreversibility by pointing out that, in the discussion about this matter, a relevant fact has not been sufficiently taken into account: the relationship between thermodynamics and mechanics involves a theoretical relation of two levels, an intra-theoretical level and an inter-theoretical level. We will try to highlight the two necessary steps to establish the link between thermodynamic irreversibility and mechanical reversibility. The first step attempts to explain the intra-theoretical relationship between macro-irreversibility and micro-reversibility in the mechanical framework. The second step intends to state the inter-theoretical relationship between the thermodynamic irreversibility expressed by the second law of thermodynamics and the macro-irreversibility obtained in the first step. Finally, the possible interpretations of these two steps from different philosophical positions will be discussed.*

**Keywords:** *Emergence; Reduction; Pluralism; Thermodynamic; Statistical mechanics; Inter-Theoretical Relationships.*

## 1. Introducción

El problema de la irreversibilidad se origina a fines del siglo XIX con los trabajos de Boltzmann, cuyo propósito era brindar una explicación puramente mecánica del aumento de entropía postulado por el segundo principio de la termodinámica (Lombardi, 2011). Con este objetivo, formuló su teorema  $H$  que, supuestamente, suministraba la reducción buscada. Sin embargo, ante las convincentes críticas de sus contemporáneos, Boltzmann efectuó un viraje teórico hacia una presentación combinatoria del problema, que dio origen a uno de los grandes enfoques teóricos que perduran hasta nuestros días. A su vez, en 1900, Gibbs formuló una presentación clara y sistemática de la mecánica estadística que enfocaba el problema de la irreversibilidad desde un ángulo diferente del adoptado por Boltzmann, pero que contaba con sus propias dificultades específicas. El problema de la irreversibilidad, que era considerado el problema central de la física por los científicos de fines del siglo XIX, si bien no resuelto, fue olvidado durante muchas décadas frente al avance de las nuevas teorías físicas formuladas a principios del siglo XX. Es sólo ya entrada la segunda mitad del siglo XX que el problema reaparece, tal vez debido a los nuevos resultados teóricos en el ámbito de los sistemas alejados del equilibrio termodinámico. Sin embargo, tampoco en esta época más reciente se logró alcanzar una solución generadora de consenso en la comunidad científica: el problema de la irreversibilidad continúa presentándose en nuestros días como uno de los grandes temas de debate en la física teórica.

En el ámbito de la filosofía de la física, el problema fue tradicionalmente concebido en términos de reducción (Frigg, 2007): cómo la termodinámica puede reducirse a la mecánica, en particular, cómo el segundo principio puede reducirse a la dinámica reversible subyacente. La relación entre termodinámica y mecánica estadística se convirtió en el paradigma de la relación interteórica bajo el modelo nageliano (Nagel, 1961). Sin embargo, ya en la década de 1970, la aplicabilidad del modelo nageliano de reducción comienza a ser severamente criticado desde diferentes perspectivas (Hull, 1972; Fodor, 1974, 1975; Kitcher, 1984). En particular, Hans Primas (1981) afirma que no existen casos científicamente significativos que se ajusten a este modelo reductivo (ver también Scerri y McIntyre, 1997; Rohrlich, 1988). Siguiendo esta tendencia, la relación entre termodinámica y mecánica estadística comienza a ser concebida en términos de emergencia (Prigogine y Stengers, 1984; Primas, 1998; Batterman, 2002). Finalmente, las últimas décadas presencian un renacimiento del reduccionismo (Fazekas, 2009; Klein, 2009; Dizadji-Bahmani et al. 2010, 2011; Needham, 2010; Butterfield, 2011a; van Riel, 2011; Schaffner, 2013), basado en debilitar el modelo nageliano original tanto en sus condiciones (se permiten aproximaciones, límites, e incluso introducción de supuestos incompatibles con la teoría reducida), como en su objetivo (se considera que la meta de la reducción ya no es la explicación, sino sólo la consistencia y la confirmación). No obstante, en estas nuevas discusiones acerca del concepto de reducción, la relación entre termodinámica y mecánica estadística continúa siendo el ejemplo paradigmático.

El objetivo del presente trabajo consiste en arrojar nueva luz sobre el problema de la irreversibilidad, señalando que en las discusiones sobre el tema no se ha tomado en cuenta que la relación entre termodinámica y mecánica involucra relaciones teóricas asimétricas en dos niveles: un nivel *intra-teórico* y un nivel *inter-teórico*. Para presentar el tema, concentraremos nuestra atención en el enfoque gibbsiano de la mecánica estadística, si bien la argumentación podría aplicarse también al enfoque de Boltzmann con las necesarias modificaciones teóricas. Sobre esta base, pondremos claramente de manifiesto los dos pasos necesarios para establecer el vínculo entre irreversibilidad termodinámica y reversibilidad mecánica: el primer paso consiste en explicar la relación intra-teórica entre macro-irreversibilidad y micro-reversibilidad en el marco mecánico; el segundo paso es establecer la relación inter-teórica entre la irreversibilidad termodinámica expresada por el segundo principio y la macro-irreversibilidad obtenida en el primer paso. Finalmente, se discutirán las posibles interpretaciones de los dos pasos desde diferentes posturas filosóficas.

## 2. Los orígenes del problema de la irreversibilidad

En muchos casos, la mejor estrategia para presentar una problemática filosófica consiste en revisar su génesis histórica. Aquí intentaremos este camino.

La idea de que el calor podía interpretarse como movimiento de partículas materiales había dominado la ciencia del siglo XVIII al amparo de las ideas de Newton, y sólo fue abandonada durante los treinta años, aproximadamente entre 1790 y 1820, durante los cuales la mayoría de los científicos suscribió la teoría del calórico. Pero transformar esa idea en una teoría cuantitativa requería modelos precisos a los cuales los recursos matemáticos de la época pudieran aplicarse fácilmente. El primer modelo de este tipo que despertó gran interés fue el presentado por Rudolf Clausius en dos artículos de 1857 y 1858, donde un gas era concebido como un conjunto de moléculas que viajaban en línea recta a una misma velocidad entre choques sucesivos.

Los artículos de Clausius captaron de inmediato el interés de James Clerk Maxwell quien, en un artículo de 1860, amplió y mejoró el enfoque original mediante la aplicación de métodos estadísticos: la llamada 'ley de distribución' permite calcular, en estado de equilibrio, la proporción de moléculas que se mueven a cada valor de velocidad. El núcleo de su aporte consistió en definir un estado macroscópico, que asimiló al equilibrio termodinámico, en el cual las incesantes colisiones que modifican las velocidades individuales de las moléculas ya no producen variación en la distribución de tales velocidades.

Si la distribución de velocidades de las moléculas de un gas es inicialmente diferente de la de Maxwell, los choques intermoleculares producirán con el tiempo tal distribución y de allí en adelante la mantendrán; al menos así debería suceder si la distribución maxwelliana fuera, como pretendía el autor, la única que permanece estable mientras las moléculas continúan chocando entre sí. El modo natural de demostrar la unicidad de la distribución de Maxwell consistiría en probar que una distribución inicial arbitraria de velocidades moleculares debe evolucionar con el tiempo hacia la distribución de Maxwell y estabilizarse en ella. De este modo se brindaría, además, una interpretación microscópica del aumento de entropía postulado por el segundo principio: en un sistema aislado, cualquier distribución inicial de velocidades correspondiente a un cierto valor de entropía evolucionará hacia el estado de equilibrio de entropía máxima, caracterizado por la distribución de Maxwell.

Precisamente en estos términos podría expresarse el programa de Boltzmann. Su objetivo consistía en brindar una explicación del segundo principio de la termodinámica en términos mecánicos, por medio de los conceptos suministrados por la teoría cinética de los gases. Con este propósito formuló en 1872 el llamado 'teorema  $H$ ', que supuestamente suministraba la explicación deseada. Sin embargo, la formulación original del teorema fue objeto de diversas críticas por parte de autores como Joseph Loschmidt y Ernest Zermelo, las cuales

pusieron de manifiesto que la demostración del teorema incorporaba supuestos implícitos que excedían los límites de la mecánica clásica. En respuesta a estas críticas, en 1877 Boltzmann presentó una nueva demostración del teorema  $H$ , abandonando el planteo cinético clásico. El nuevo método se basaba en contar el número de microestados mecánicamente posibles compatibles con cada valor de la función de distribución de velocidades. Mediante un procedimiento totalmente combinatorio, Boltzmann calculaba el número de microestados diferentes que corresponden a un mismo estado macroscópico, esto es, a un mismo valor de la función de distribución. El macroestado más probable será, entonces, aquél al cual corresponda el número máximo de microestados y hacia él tenderá, con alta probabilidad, la evolución del sistema. De aquí surge la idea de Boltzmann de identificar la entropía de cada macroestado con una medida del número de sus microestados correspondientes. Boltzmann denomina ‘compleción’ a cada uno de los modos microscópicos diferentes de realizar un macroestado. Su más importante contribución se resume en la famosa fórmula que relaciona el número  $W$  de compleciones correspondientes a un macroestado y su entropía  $S$ :

$$S = k \ln W$$

donde  $k$  es la llamada ‘constante de Boltzmann’. Finalmente, Boltzmann demostraba que el macroestado con máximo número de microestados se da cuando la función de distribución de velocidades adquiere la forma postulada por Maxwell. El enfoque combinatorio de Boltzmann no resultó inmune a ulteriores críticas, y hasta nuestros días continúa siendo discutido conceptualmente a pesar de su amplia aplicabilidad (ver discusión en Lombardi y Labarca, 2005). En el presente trabajo no analizaremos estos aspectos, porque presentaremos nuestra argumentación sobre la base del otro gran enfoque de la mecánica estadística, que será el objeto de la próxima sección.

### 3. El enfoque de Gibbs

En el contexto del por entonces ya ampliamente discutido problema de la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística, en 1902 el físico estadounidense Josiah Willard Gibbs presenta su famosa obra *Elementary Principles of Statistical Mechanics*, donde concibe un sistema termodinámico como un sistema mecánico en un estado microscópico especificado de un modo incompleto. La estrategia general de Gibbs consiste en abandonar el intento de describir la evolución de los microestados mecánicos de un sistema, y concentrar la atención en el comportamiento de lo que denomina ‘ensamble representativo’ del sistema: un conjunto de sistemas abstractos, conceptualmente contruidos, que se encuentran en microestados diferentes pero siempre compatibles con el macroestado del sistema bajo estudio.

El comportamiento del ensamble se describe en el lenguaje cuasi-geométrico del espacio de las fases: para un sistema de  $N$  partículas, el espacio de las fases  $\Gamma$  correspondiente es un espacio de  $6N$  dimensiones ortogonales, tres por las coordenadas posicionales  $q_i$  y tres por las componentes  $p_i$  de los momentos cinéticos de cada una de las  $N$  partículas. De este modo, el microestado mecánico de cada sistema del ensamble queda representado por un punto en el espacio de las fases y el ensamble como un todo se convierte así en una “nube” de puntos representativos. El comportamiento temporal del ensamble se asocia al flujo de la nube de puntos en el espacio de las fases, cada uno de los cuales describe una trayectoria de acuerdo con las leyes de la mecánica clásica. Si el número de sistemas del ensamble es suficientemente alto, la situación del ensamble en cada instante  $t$  puede especificarse mediante la densidad  $\rho(q_i, p_i, t)$  de distribución de los puntos representativos en el espacio de las fases, cumpliéndose que:

$$N = \int \dots \int \rho(q_i, p_i, t) dq_i dp_i$$

En general,  $\rho$  se considera normalizada a la unidad,  $1 = \int \dots \int \rho(q_i, p_i, t) dq_i dp_i$ ; en este caso,  $\rho$  es una medida que brinda la probabilidad por unidad de volumen del espacio de las fases de que un punto representativo del microestado mecánico del sistema representado por el ensamble se encuentre en las diferentes regiones del espacio de las fases.

Por simplicidad, designemos mediante la variable  $x$  los puntos del espacio de las fases, de modo que  $\rho(q_i, p_i) = \rho(x)$ . La función  $\rho(x)$  permite calcular los promedios, sobre todos los sistemas del ensamble, de cualquier magnitud mecánica que dependa de los microestados de tales sistemas. Si consideramos una magnitud representada por una función de fase  $f : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$ , su *promedio en fase*  $\langle f(x) \rangle$  se calcula:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Gamma} f(x) \rho(x) dx$$

A su vez, la *entropía de Gibbs*  $S_G$  se define como:

$$S_G = -k \int_{\Gamma} \rho(x) \log \rho(x) dx$$

En este enfoque, se define *equilibrio estadístico* como la situación en la cual la densidad de probabilidad representada por  $\rho(x)$  y los promedios en fase son independientes del tiempo. Un modo sencillo de asegurar el equilibrio estadístico es construir un ensamble para el cual  $\rho(x)$  se distribuye uniformemente sobre todo el espacio de las fases. En particular, para representar un sistema aislado en equilibrio estadístico Gibbs recurre a lo que denomina *ensamble microcanónico*, cuya distribución  $\rho_{\mu}(x)$  se define como:

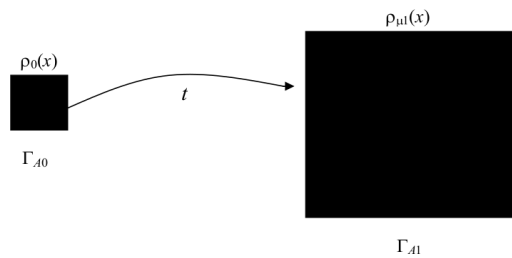
$$\left. \begin{array}{l} \rho_{\mu}(x) = cte \\ \rho_{\mu}(x) = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{para } x \in \Gamma_A \\ \text{para } x \in \Gamma_A \end{array}$$

donde  $\Gamma_A \subset \Gamma$  es la región accesible del espacio de las fases, definida por la energía y los vínculos impuestos al sistema bajo estudio. En esta situación de equilibrio estadístico, el promedio en fase de cualquier función de fase  $f(x)$  es constante en el tiempo y se calcula como:

$$\langle f(x) \rangle_{\mu} = \int_{\Gamma} f(x) \rho_{\mu}(x) dx$$

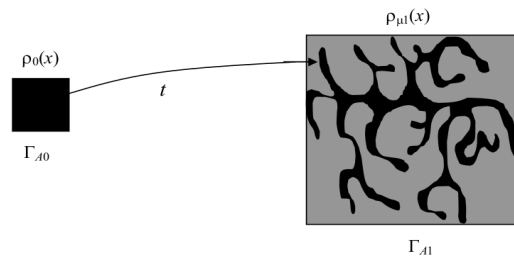
¿Cómo dar cuenta, desde la perspectiva gibbsiana, de la macroevolución de un sistema hacia el equilibrio termodinámico? Supóngase un sistema aislado, sometido a ciertos vínculos  $V_0$ , inicialmente en equilibrio estadístico; en esta situación, el sistema es adecuadamente representado por un ensamble microcanónico definido por la distribución  $\rho_{\mu_0}(x)$  cuyo soporte se encuentra confinado en la región accesible  $\Gamma_{A0}$ . Si en  $t_0$  se modifican los vínculos aplicados al sistema —por ejemplo, en el caso de un gas confinado en la mitad izquierda de un recipiente, se elimina el tabique divisor—, la situación originalmente de equilibrio se convierte en una de no-equilibrio que evoluciona hacia una nueva situación de equilibrio determinada por los nuevos vínculos  $V_1$  impuestos al sistema.

En la descripción de Gibbs, el ensamble microcanónico original representado por  $\rho_{\mu_0}(x)$  se convierte, en  $t_0$ , en un ensamble de no-equilibrio representado por  $\rho_0(x)$ , que debería evolucionar hacia un nuevo ensamble microcanónico definido por la distribución  $\rho_{\mu_1}(x)$ , con su soporte confinado en la nueva región accesible  $\Gamma_{A1}$  definida por los nuevos vínculos  $V_1$ . En otras palabras, luego de un tiempo suficientemente largo, debería darse la evolución  $\rho_0(x) \rightarrow \rho_{\mu_1}(x)$ , alcanzándose la nueva situación de equilibrio.



El problema de la irreversibilidad es el resultado del hecho de que tal evolución no es posible, ya que los sistemas del ensamble inicial evolucionan según las leyes de la mecánica cumpliendo el teorema de Liouville. De acuerdo con este teorema, cualquier región del espacio de las fases que posea una densidad de distribución uniforme evoluciona según la mecánica clásica manteniendo su

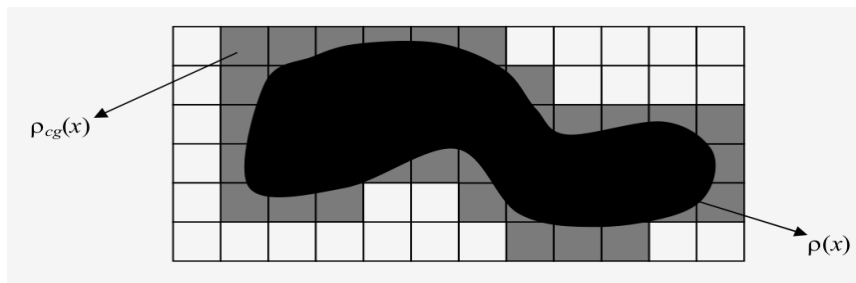
volumen constante en el tiempo (ver, por ejemplo, Tolman, 1938, 48-52). En otras palabras, si las condiciones iniciales macroscópicas del sistema fijan una densidad  $\rho_0(x)$  que difiere de cero en una cierta región del espacio de las fases, tal región inicial puede deformarse con el tiempo y tornarse tan “filamentosa” como para extenderse hasta zonas distantes en el espacio de las fases, pero su volumen permanece siempre constante.



En consecuencia,  $\rho_0(x)$  no puede evolucionar hasta convertirse en una densidad que realmente cubra la región accesible  $\Gamma_{A1}$  correspondiente a la nueva situación de equilibrio. A su vez, la entropía de Gibbs  $S_G$  se mantiene constante durante toda la evolución, de modo que no puede representar la entropía termodinámica  $S$  regida por el segundo principio (ver Lombardi, 2003).

En el enfoque de Gibbs, lo que en realidad sucede es que, bajo condiciones de suficiente inestabilidad, la región inicial se ha distribuido y ramificado hasta el punto de cubrir de un modo *aparentemente* uniforme la región  $\Gamma_{A1}$  correspondiente a la nueva situación de equilibrio. A fin de dar cuenta de este proceso, se define una *distribución de grano grueso (coarse grain)*  $\rho_{cg}(x)$  sobre una partición del espacio de las fases. En efecto, si se divide el espacio de las fases  $\Gamma$  en celdas  $C_i$  de igual volumen  $c_i$ , la distribución  $\rho_{cg}(x)$  puede definirse para cada celda en función de la distribución de grano fino  $\rho(x)$  del siguiente modo: para cada celda  $C_i$ ,

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{cg} = 0 \\ \rho_{cg} = 1/c_i \int_{C_i} \rho(x) dx \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{si } \forall x \in C_i, \rho(x) = 0 \\ \text{si } \exists x \in C_i, \rho(x) \neq 0 \end{array}$$



Sobre la base de esta distribución  $\rho_{cg}(x)$ , se define la *entropía de grano grueso*  $S_{cg}$  de un modo análogo a la entropía de Gibbs:



$$S_{cg} = -k \int_{\Gamma} \rho_{cg}(x) \log \rho_{cg}(x) dx$$

y puede esperarse que aumente a través de la evolución a medida que la región inicial vaya ingresando en mayor cantidad de celdas. Se demuestra que, si el sistema posee un grado suficiente de inestabilidad como para ser un sistema *mezclador*, esto es, si la región inicial se deforma a través de la evolución (Lebowitz y Penrose, 1973), entonces la función de distribución de grano grueso, considerada como una función del tiempo  $\rho_{cg}(x, t)$ , tiende a un límite definido para  $t \rightarrow \infty$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_{cg}(x, t) = \rho_{cg(eq)}(x)$$

Por lo tanto, la entropía de grano grueso  $S_{cg}(t)$  tiende a un valor máximo de equilibrio:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S_{cg}(t) = S_{cg(eq)}$$

Precisamente por esta propiedad de aumentar su valor hasta un máximo, la entropía de grano grueso  $S_{cg}$  es la magnitud que se asimila a la entropía termodinámica  $S$ , ya que manifiesta la evolución irreversible descrita por el segundo principio.

Sobre esta base, el formalismo basado en la propuesta gibbsiana suele presentarse como una explicación del segundo principio en términos mecánicos. Sin embargo, el enfoque de Gibbs ha recibido numerosas críticas en tanto genuina reducción de la termodinámica a la mecánica (Lebowitz, 1993; Bricmont, 1995). No obstante, aquí no nos detendremos en el análisis de tales críticas, ya que para nuestros fines sólo es necesario admitir que el enfoque de Gibbs establece un vínculo formal preciso entre termodinámica y mecánica, en particular, entre la irreversibilidad propia del segundo principio y la reversibilidad de la dinámica subyacente. Lo que nos interesará señalar aquí es que el vínculo encierra dos tipos de relaciones diferentes, que analizaremos en detalle en la próxima sección.

#### 4. Dos tipos de relación teórica

En las discusiones acerca de reducción, se han propuesto dos ulteriores distinciones: Thomas Nickles (1973) distingue entre reducción con preservación de dominio (*domain-preserving reduction*) y reducción con combinación de dominios (*domain-combining reduction*); a su vez, William Wimsatt (1976) distingue entre reducción intra-nivel y reducción inter-nivel. En ambos casos, se trata de distinciones relacionadas con la tradicional diferencia entre reducción homogénea y reducción heterogénea de Nagel, pero no idénticas a ella. Aquí no seguiremos este camino por dos motivos. En primer lugar, porque pretendemos no pronunciarnos acerca de la naturaleza de las relaciones teóricas consideradas, en particular, si se trata de relaciones reductivas o expresan una emergencia no reductiva. Y en segundo lugar porque, de ser reductiva, la distinción que establece-

remos se encontraría dentro del caso heterogéneo según Nagel, o de combinación de dominios según Nickles, o inter-nivel según Wimsatt, caso que justamente toma la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística como su ejemplo paradigmático.

Consideremos dos ítems ontológicos  $I_1$  e  $I_2$ , referidos por los términos  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente, que pertenecen a ciertas teorías científicas. Pueden distinguirse dos casos de relaciones asimétricas:

- *Relación inter-teórica*: relación que se establece entre los términos  $t_1$  y  $t_2$  cuando pertenecen a dos teorías diferentes  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente. Si dicha relación es asimétrica, puede interpretarse como expresando una dependencia ontológica entre los ítems  $I_1$  e  $I_2$ .
- *Relación intra-teórica*: relación que se establece entre los términos  $t_1$  y  $t_2$  cuando pertenecen a una misma teoría  $T$ . Nuevamente, la asimetría de la relación indicaría la dependencia ontológica entre los ítems  $I_1$  e  $I_2$ , que en este caso pertenecen al mismo dominio óntico, el descrito por la teoría  $T$ .

El caso típico de relación asimétrica intra-teórica es el vínculo muchos-a-uno que se establece entre estados o propiedades definidos en el marco de una misma teoría. Ejemplo paradigmático de este caso es la definición de macroestados en términos de conjuntos de microestados mecánicos en el estudio del determinismo en sistemas inestables. En el micro-nivel, los microestados se representan por puntos en el espacio de las fases y las microevoluciones quedan representadas por secuencias de microestados, es decir, por trayectorias. En el macro-nivel, los macroestados se representan por regiones de volumen no nulo en el espacio de las fases, y las macroevoluciones quedan representadas por secuencias de macroestados. A pesar de la clara relación entre ambos niveles, el micro-comportamiento y el macro-comportamiento son completamente diferentes, incluso contradictorios (Lombardi, 2003):

- En el *micro-nivel*, las microevoluciones son completamente deterministas, puesto que se encuentran gobernadas por las leyes de la mecánica clásica.
- En el *macro-nivel*, si el sistema es suficientemente inestable —si es un sistema K—, las macroevoluciones son indeterministas: los únicos macroestados que quedan unívocamente determinados son aquellos que tienen probabilidad cero o uno independientemente de la macro-historia completa del sistema.

Los ejemplos de relación asimétrica intra-teórica son casos típicos de aquello que se ha denominado ‘superveniencia’, término utilizado por primera vez en su significado filosófico por Donald Davidson (1970) en el campo de la filosofía de

la mente. Dados dos conjuntos de propiedades,  $A$  (el conjunto superveniente) y  $B$  (el conjunto basal o subveniente),  $A$  superviene sobre  $B$  cuando dos cosas no pueden diferir respecto de propiedades  $A$  sin diferir también respecto de sus propiedades  $B$ . En otras palabras, una diferencia en propiedades  $A$  requiere una diferencia en propiedades  $B$ , pero no a la inversa. La relación de superveniencia se da cuando existe realizabilidad múltiple, esto es, cuando la relación entre el nivel basal y el nivel superveniente es de muchos-a-uno: una misma propiedad del nivel superior puede realizarse a través de muchas propiedades diferentes del nivel inferior.

Las relaciones asimétricas inter-teóricas son aquellas que, en las discusiones acerca de la reducción nageliana heterogénea, han sido denominadas ‘leyes-puente’ (Nagel, 1961). El estatuto de las leyes-puente es el aspecto más conflictivo en los debates acerca del modelo nageliano de reducción, y ello es comprensible porque el modo en que se entiende el concepto de reducción depende esencialmente del modo en que se interpreten las leyes-puente. Si bien Nagel las introduce como bi-condicionales, de inmediato señala que, según la naturaleza de la relación postulada, pueden expresar vínculos de significado, meras convenciones o relaciones fácticas. Estas observaciones ponen claramente de manifiesto que la forma lógica bi-condicional de las leyes-puente no resulta suficiente para determinar el tipo de relación interteórica que ellas establecen. Pero, a la vez, las alternativas que ofrece Nagel han abierto las puertas a múltiples interpretaciones, desde aquellas que conciben las leyes-puente como identidades o, al menos, como conexiones legales (Sklar, 1967; Schaffner, 1993; Esfeld y Sachse, 2007; van Riel, 2011), hasta las que las conciben como expresiones de meras correlaciones o coinstanciaciones (Kim, 2008; Klein, 2009; Dizadji Bahmani, Frigg y Hartmann, 2010). Estas interpretaciones se corresponden, respectivamente, con una interpretación fuerte de la reducción, que involucra una relación óptica entre los dominios de las teorías involucradas, y con una interpretación débil de la reducción, concebida como una mera reducción inter-teórica sin connotaciones ontológicas.

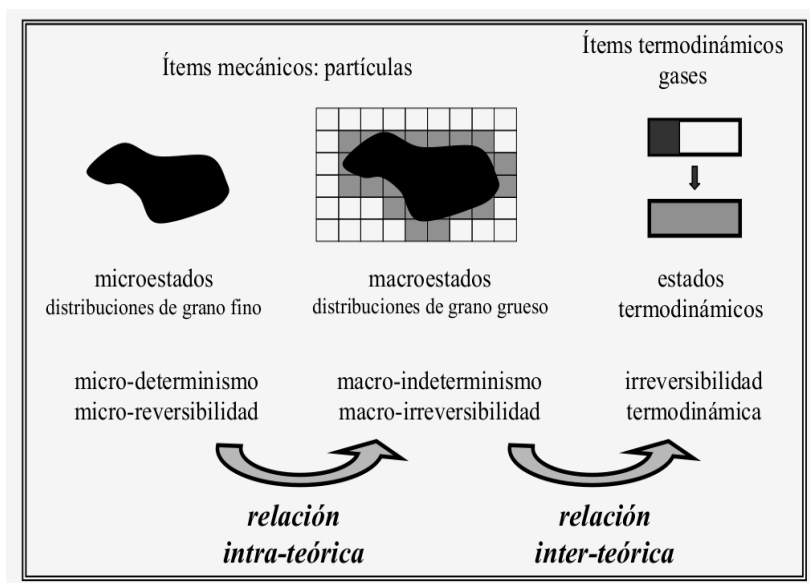
Si esta distinción entre relaciones asimétricas inter-teóricas e intra-teóricas se aplica al caso del enfoque de Gibbs en mecánica estadística, resulta muy claro que el vínculo entre la irreversibilidad termodinámica y la reversibilidad dinámica subyacente requiere de ambas:

- En primer lugar, es necesario encontrar en el dominio mecánico una magnitud que se comporte dinámicamente como la entropía termodinámica, esto es, que aumente a través del tiempo hasta alcanzar su valor de equilibrio. En el marco gibbsiano, la magnitud en cuestión es la entropía de grano grueso, que cumple con esta propiedad cuando el sistema es mezclador. De este modo, se establece una *relación intra-teórica* entre la ma-

cro-irreversibilidad mecánica y la micro-reversibilidad mecánica, relación que resulta ser asimétrica porque la primera resulta de la segunda bajo condiciones de suficiente inestabilidad.

- En segundo lugar, es necesario postular una *relación inter-teórica* que vincule la macro-irreversibilidad mecánica obtenida en el primer paso y la irreversibilidad termodinámica descrita por el segundo principio.

Es interesante notar que el hecho de que el vínculo entre termodinámica y mecánica estadística exige dos pasos conceptuales, si bien usualmente pasado por alto en las discusiones sobre el tema, fue reconocido por el propio Gibbs. En efecto, en primer lugar calculó ciertas magnitudes para el ensamble microcanónico, pero luego asoció tales magnitudes con magnitudes termodinámicas mediante sus “analogías termodinámicas” (Gibbs, 1902, Chapter 14, “*Discussion of thermodynamic analogies*”). Como subraya Jos Uffink: “[Gibbs] enfoca esta cuestión con mucha cautela, señalando ciertas analogías entre relaciones que se cumplen para los ensambles canónico y microcanónico y resultados de la termodinámica.” (Uffink, 2007, 994; Sklar, 1993).



## 5. El problema de la irreversibilidad desde distintas perspectivas

Hasta aquí, hemos intentado mantenernos neutrales acerca de cómo interpretar los dos tipos de relaciones necesarias para establecer el vínculo teórico entre la irreversibilidad termodinámica y la reversibilidad mecánica subyacente. En esta sección, en cambio, analizaremos el sentido que debería adjudicárseles desde diferentes perspectivas acerca del modo en que los dominios referidos por diferentes teorías científicas se relacionan entre sí.

### 5.1. La perspectiva reduccionista

A pesar del declarado rechazo de la metafísica por parte de los positivistas lógicos, incluso para algunos de ellos la reducción inter-teórica tenía una motivación óptica: la reducción era considerada deseable porque sería de ayuda en la elaboración de una imagen ontológicamente parsimoniosa y completa de la realidad (Neurath, 1935). Tal vez esta idea de reducción óptica estuvo a la base de las ideas originales de Nagel acerca de reducción: por ejemplo, en su trabajo pionero de 1949, asumía que todos los términos de la teoría reducida deben definirse mediante términos de la teoría reductora (Nagel, 1949). Si las leyes puente fueran estrictamente definiciones, en principio todo aquello que puede ser dicho con la teoría reducida podría también ser dicho con la teoría reductora. Y, a su vez, la eliminación teórica brindaría buenos motivos para creer en la eliminación óptica; como afirma claramente Lawrence Sklar: “Las ondas de luz no están correlacionadas con las ondas electromagnéticas, ya que *son* ondas electromagnéticas” (Sklar, 1967, 120). Estas motivaciones ópticas desaparecen en ciertas posturas neo-reduccionistas recientes, que intentan apartarse de la metafísica con un ahínco aún mayor que el de sus predecesores del Círculo de Viena: por ejemplo, Foad Dizadji Bahmani, Roman Frigg y Stephan Hartmann (2010) sostienen explícitamente que las relaciones reductivas son relaciones inter-teóricas con connotaciones meramente metodológicas, como la búsqueda de simplicidad y la transferencia de confirmación de un ámbito teórico a otro, pero sin implicancia ontológica alguna (Needham, 2010).

La relevancia de los supuestos ontológicos en los intentos de reducir una teoría científica a otra es particularmente clara en el caso paradigmático de la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística y de la irreversibilidad termodinámica a la reversibilidad mecánica. Cuando Boltzmann intentaba explicar los fenómenos térmicos en gases y de reducir el segundo principio en términos mecánicos, su esfuerzo científico no era impulsado exclusivamente por la búsqueda de simplicidad y el respaldo confirmatorio. Su programa estaba explícitamente motivado por el supuesto ontológico de que los gases no eran más que partículas en interacción mecánica. Otro caso menos estudiado, tal vez por su fracaso científico, fue el intento de Maxwell de reducir el electromagnetismo a la mecánica, bajo el supuesto ontológico de que los fenómenos electromagnéticos eran vibraciones mecánicas del éter luminífero. En ambos casos, subyacía la hipótesis de que toda la naturaleza estaba compuesta de entidades regidas por las leyes de la física descubiertas por Newton: era precisamente este supuesto ontológico aquello que justificaba las estrategias dirigidas a explicar las nuevas teorías (termodinámica, electromagnetismo) mediante la mecánica clásica.

Respecto de la relación intra-teórica, el reduccionista no encontrará obstáculos para interpretarla en sus propios términos. En efecto, si bien la superveniencia usualmente se asocia a la emergencia, los reduccionistas suelen considerar que es compatible con la reducción o incluso que es un caso de reducción. Por ejemplo,

desde una concepción meramente epistémica de la reducción, Jeremy Butterfield (2011a; 2011b) insiste en que la superveniencia es compatible con la reducción en la medida en que el concepto de reducción puede flexibilizarse lo suficiente como para admitir muchos tipos diferentes de conexiones formales. Desde un punto de vista óptico, el reduccionista puede argumentar que en la realidad no existe nada más allá de lo que existe en el nivel basal subyacente. Por ejemplo, incluso si una fotografía tiene propiedades gestálticas, “la fotografía y sus propiedades se reducen a la disposición espacial de píxeles claros y oscuros. No son nada más allá de los píxeles” (Lewis, 1994, 294). Se trataría de una reducción casi trivial, puesto que es intra-teórica.

Aunque insista en concebir la realizabilidad múltiple en el dominio mecánico como reducción, el reduccionista no se libra de la necesidad de tomar una decisión acerca de la relación inter-teórica entre la macroevolución mecánica y la evolución termodinámica, donde se juega la reducción en un sentido no trivial. Es aquí donde se plantean todos los problemas relacionados con la noción de leyes-puente. Para una postura ontológicamente reduccionista, no alcanza la idea gibbsiana de “analogía”: la relación entre los términos de las teorías reductora y reducida debe ser definicional, de modo de establecer la identidad entre los ítems respectivos. De este modo, las evoluciones termodinámicas irreversibles no serían más que macro-evoluciones mecánicas en condiciones de alta inestabilidad, así como la temperatura no sería otra cosa que energía cinética media por molécula.

Si bien la interpretación de las leyes-puente como definiciones establece la identificación entre los dominios de las dos teorías, no se logra introducir otro ingrediente esencial a la reducción: la asimetría de la relación. En efecto, bajo cualquier lectura, sea débil o fuerte, la reducción es una relación asimétrica: si  $A$  se reduce a  $B$ , entonces  $B$  no se reduce a  $A$ . Ahora bien, si la relación entre los términos de las teorías es definicional, la asimetría no surge de la propia relación. Esto pone de manifiesto un aspecto pocas veces señalado: la asimetría de la relación reductiva suele no venir impuesta por motivos teórico-formales, sino que es un supuesto ontológico que se añade a la relación teórica de modo usualmente implícito e inadvertido. En nuestro caso, la identificación entre evoluciones termodinámicas irreversibles y macro-evoluciones mecánicas, o entre temperatura y energía cinética media por molécula no establece una asimetría entre ambos polos de la relación: el carácter asimétrico del vínculo, que hace que la termodinámica se reduzca a la mecánica estadística, es un supuesto ontológico que se sigue de la creencia en el carácter más básico o fundamental del dominio microscópico subyacente.

En definitiva, la distinción entre los dos tipos de relación involucrados en los vínculos entre termodinámica y mecánica estadística pone de manifiesto que la asimetría queda confinada a la relación intra-teórica, mientras que en la relación inter-teórica, donde supuestamente se juega la reducción, la asimetría es un supuesto ontológico que se agrega a los vínculos formales entre teorías.

## 5.2. La perspectiva emergentista

Dada la polisemia del término ‘emergencia’, comencemos por introducir ciertas distinciones. En primer lugar debe distinguirse entre emergencia epistemológica y ontológica (O’Connor y Wong, 2015): mientras la primera se asienta en las limitaciones del sujeto de conocimiento, la segunda supone que el mundo está constituido en su totalidad por entidades básicas que se organizan en diferentes niveles de creciente complejidad donde surgen los nuevos ítems. Algunos autores distinguen entre emergencia diacrónica y sincrónica (Kim, 1999; Rueger, 2000; Humphreys, 2008): la primera refiere a aquellas entidades, propiedades y comportamientos que aparecen en la evolución temporal de un sistema; la segunda establece una relación entre las entidades, propiedades y comportamientos de un sistema y su microestructura. No es éste el lugar para ahondar en estas distinciones; sólo las mencionamos para dejar claro desde el comienzo que, en lo que sigue, nos referiremos siempre a emergencia ontológica sincrónica.

La noción de emergencia es muy atractiva: respecto del dominio subyacente del cual surgen, los ítems emergentes suelen caracterizarse como novedosos, impredecibles, inexplicables e irreducibles en términos del nivel basal. En palabras de Philip Anderson (1972), ‘emergencia’ expresa la idea de que el todo no es meramente mayor, sino que es diferente de la suma de las partes. Sin embargo, apenas se intenta dotar esta idea general de mayor precisión, aparecen muchas formas distintas de concebir la emergencia, que pueden variar incluso de autor a autor.

Tal vez esta amplia divergencia respecto el concepto de emergencia explica el hecho de que los emergentistas no adoptan una posición compartida respecto de la superveniencia. Muchos autores consideran que el concepto de superveniencia es lo que brinda precisión a la noción de emergencia. Por ejemplo, Hilary Putnam (1975) concibe la superveniencia como emergencia porque, dado que es posible que las propiedades basales sean diferentes pero la superveniente sea una y la misma, entonces no se puede decir que la segunda se reduce a las primeras en el sentido de describir lo mismo desde diferentes perspectivas. En la misma línea, Brian McLaughlin (1997) define emergencia como superveniencia de propiedades más superveniencia de leyes fundamentales, y Alexander Rueger (2000) concibe la emergencia como superveniencia estable y robusta. Por el contrario, otros autores emergentistas son escépticos acerca de la superveniencia, puesto que consideran que, aun si las propiedades supervenientes resultan novedosas, las regularidades de alto nivel en las que participan son siempre resultado de las regularidades del nivel basal. Desde esta perspectiva, el caso paradigmático —o incluso el único caso genuino— de emergencia es el entrelazamiento cuántico (Humphreys, 1997; Silberstein y McGeever, 1999; Howard, 2007).

Resulta claro que, aquellos emergentistas escépticos acerca de la superveniencia considerarán que las relaciones asimétricas intra-teóricas, tal como han sido aquí caracterizadas, no son un caso legítimo de emergencia. Esa postura los con-

duciría a negar la emergencia del dominio termodinámico a partir del mecánico si asumen, siguiendo una opinión muy difundida, que el primero superviene a partir del segundo. Sin embargo, la distinción entre relaciones intra-teóricas e inter-teóricas en el vínculo entre termodinámica y mecánica estadística permite eludir esta conclusión. En efecto, las relaciones intra-teóricas, que permiten definir la macro-irreversibilidad mecánica en términos de la micro-irreversibilidad mecánica (así como magnitudes estadísticas a partir de magnitudes mecánicas), no expresarían emergencia sino sólo superveniencia. Pero aún es posible, y razonable para un emergentista, admitir que la relación inter-teórica entre la macro-irreversibilidad mecánica y la irreversibilidad termodinámica (así como, por ejemplo, entre la temperatura y la energía cinética media por molécula) sí se trata de un caso genuino de emergencia, y de ello deriva el carácter asimétrico de la relación.

### 5.3. La perspectiva pluralista

Las últimas décadas han presenciado la propuesta de muy diversas perspectivas ontológicamente pluralistas (Putnam, 1981, 1990; Torretti, 2000, 2008; El-Hani y Pihlström, 2002; Lombardi y Labarca, 2005, 2006; Lombardi 2014a): si bien las distintas versiones difieren en sus aplicaciones particulares, todas ellas coinciden en el rechazo del realismo metafísico al que usualmente se alude como la perspectiva del ojo de Dios, esto es, el supuesto de la existencia de una perspectiva neutral y privilegiada desde la cual la realidad puede describirse científicamente tal como es en sí misma. De acuerdo con el pluralismo ontológico, por el contrario, los dominios ónticos de la ciencia se constituyen como una síntesis entre la realidad independiente, “nouménica”, y los esquemas categoriales y conceptuales implícitos en nuestras teorías científicas. Tales esquemas adquieren estabilidad como consecuencia del éxito pragmático de las teorías que los presuponen. Desde esta perspectiva, inspirada en la filosofía kantiana y en el pragmatismo americano, la pregunta metafísica acerca de la existencia de un cierto ítem científico, independiente de la teoría y la práctica de la ciencia, carece de sentido.

El pluralismo ontológico fue formulado principalmente como una reacción crítica al reduccionismo ontológico que refiere la realidad completa a un único dominio, en general el descrito por la física “fundamental”. Si el pluralismo ontológico se defiende de un modo consistente, también debería rechazarse el emergentismo, incluso en sus formas más débiles. En efecto, desde esta postura no puede aceptarse ningún supuesto acerca de la estructura de la realidad independiente de toda teoría científica (ver discusión detallada en Lombardi y Pérez Ranzanz, 2012): por ejemplo, afirmar que los términos ‘gas’ (tal como se usa en termodinámica, como refiriendo a un ítem con presión, volumen, temperatura, entropía, etc.) y ‘sistema de partículas’ (tal como se usa en mecánica, para describir sistemas de ítems que se comportan de acuerdo con la mecánica clásica) refieren a lo mismo en la realidad es un supuesto metafísico no respaldado por



teoría científica alguna. Por lo tanto, no puede atribuirse una propiedad que pertenece a un dominio óntico a una entidad perteneciente a otro dominio donde la propiedad no existe: la temperatura no puede atribuirse de un modo consistente a un sistema de partículas mecánicas ni la evolución irreversible con aumento de entropía a su comportamiento dinámico.

Como consecuencia, el pluralismo ontológico impone el rechazo del supuesto de asimetría inherente al emergentismo. Puesto que tanto el dominio supuestamente emergente como el dominio supuestamente basal se encuentran igualmente constituidos como síntesis entre realidad independiente y esquemas teóricos, no existe ningún punto de vista neutral desde el cual pueda afirmarse que uno de los dominios tiene prioridad ontológica por sobre el otro. El emergentista podría responder afirmando que la asimetría de la relación no responde a una motivación exclusivamente metafísica, sino que existen razones pragmáticas e históricas para aceptarla. Sin embargo, los contra-argumentos emergentistas no parecen ser suficientes para restaurar la dependencia ontológica que critica el pluralista (Lombardi, 2014b).

Desde el punto de vista de la cuestión pragmática, es cierto que la mecánica clásica demostró su éxito en sus múltiples aplicaciones durante siglos. Pero no dependió de ellas el enorme impacto tecnológico de la termodinámica, que dio fundamento y profundizó uno de los más importantes eventos de la historia de la humanidad, esto es, la revolución industrial (para un argumento análogo respecto del éxito pragmático de la química, ver Lombardi y Labarca, 2011; Lombardi, 2014b). Por otra parte, la historia de la ciencia muestra diversos casos donde el reemplazo de la teoría “basal” no afectó la teoría que describía el dominio supuestamente emergente. Y es precisamente el caso de la termodinámica el que brinda el ejemplo paradigmático de esta situación histórica: el papel de teoría fundamental fue cumplido inicialmente por la teoría del calórico, luego por la mecánica clásica, y aún más tarde por la mecánica cuántica, y los vínculos inter-teóricos fueron adaptándose a estos cambios; sin embargo, la termodinámica no se modificó a través del proceso. Según el pluralista ontológico, si el destino de la teoría que supuestamente describe el dominio emergente es inmune al destino de la teoría que describe el dominio supuestamente basal, no hay buenos motivos filosóficos para aceptar la dependencia ontológica del primer dominio respecto del segundo (Lombardi y Labarca, 2006).

Es interesante señalar que el rechazo de la emergencia inter-teórica por parte del pluralista ontológico no implica su rechazo de la emergencia intra-teórica. En la medida en que las relaciones de muchos-a-uno, propias de la superveniencia, puedan definirse con el lenguaje y el marco categorial-conceptual de una misma teoría científica y, por tanto, en un mismo dominio óntico, no existe obstáculo conceptual alguno para concebirlas en términos de emergencia. Desde una perspectiva ontológicamente pluralista se podría, entonces, admitir que la macro-irreversibilidad mecánica emerge de la micro-reversibilidad de la dinámica

subyacente, pero rechazando la emergencia de la irreversibilidad termodinámica a partir de la macro-irreversibilidad mecánica. En este sentido, el pluralista ontológico adoptaría una posición respecto de la emergencia opuesta a la que adopta el emergentista escéptico, quien impugna la caracterización de la superveniencia intra-teórica como un caso genuino de emergencia, pero admite la posibilidad de emergencia inter-teórica.

## 6. Conclusiones

El problema de la irreversibilidad, derivado del problema de la relación entre termodinámica y mecánica estadística y, con ello, entre los dominios termodinámico y mecánico, se encuentra cerca de cumplir los 150 años. A pesar de esto, continúa siendo objeto de intensas discusiones. En el presente trabajo se ha intentado brindar nuevos elementos para enriquecer el debate, no provenientes del campo técnico-teórico, sino del ámbito filosófico. En particular, se ha argumentado que la distinción entre dos tipos de relaciones teóricas, las intra-teóricas y las inter-teóricas, permite efectuar un análisis más fino del problema. Se ha evitado tomar partido en favor de una postura filosófica definida acerca de las relaciones inter-teóricas, precisamente para considerar el modo en que la distinción influye en los argumentos que las diferentes posturas pueden esgrimir a la hora de vincular la irreversibilidad termodinámica derivada del segundo principio y la reversibilidad dinámica que se sigue de las leyes de la mecánica clásica. Más allá de este objetivo específico, este trabajo aspira a brindar elementos para explorar las relaciones inter-teóricas que pueden establecerse en otras áreas de la física, e incluso en otras disciplinas científicas como la química y la biología.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al subsidio N° 57919 de la John Templeton Foundation, y el subsidio PICT-2812 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina.

## Referencias bibliográficas

- Anderson, Philip (1972). More is Different. *Science*, 177, 393-396.
- Batterman, Robert (2002). *The Devil in the Details*. Oxford: Oxford University Press.
- Bricmont, Jean (1995). Science of Chaos or Chaos in Science. *Physicalia*, 17, 159-208.
- Butterfield, Jeremy (2011a). Emergence, Reduction and Supervenience: A Varied Landscape. *Foundations of Physics*, 41, 920-959.

- Butterfield, Jeremy (2011b). Less is Emergence and Reduction Reconciled. *Foundations of Physics*, 41, 1065-1135.
- Davidson, Donald. (1970). Mental Events. En L. Foster y J. W. Swanson (Eds.), *Experience and Theory* (pp. 79-101). Amherst, MA: The University of Massachusetts Press.
- Dizadji-Bahmani, Foad, Frigg, Roman y Hartmann, Stephan (2010). Who is afraid of Nagelian reduction? *Erkenntnis*, 73, 393-412.
- Dizadji-Bahmani, Foad, Frigg, Roman y Hartmann, Stephan (2011). Confirmation and reduction: A Bayesian account. *Synthese*, 179, 321-338.
- El-Hani, Charbel y Pihlström, Sami. (2002). Emergence theories and pragmatic realism. *Essays in Philosophy*, 3(2), Art. 3.
- Esfeld, Michael y Sachse, Christian (2007). Theory reduction by means of functional sub-types. *International Studies in the Philosophy of Sciences*, 21, 1-17.
- Fazekas, Peter (2009). Reconsidering the role of bridge laws in inter-theoretic reductions. *Erkenntnis*, 71, 303-322.
- Fodor, Jerry (1974). Special sciences (or: The disunity of sciences as a working hypothesis). *Synthese*, 28, 97-115.
- Fodor, Jerry (1975). *The Language of Thought*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Frigg, Roman (2007). A field guide to recent work on the foundations of thermodynamics and statistical mechanics. En D. Rickles (ed.), *The Ashgate Companion to the New Philosophy of Physics* (pp. 99-196). London: Ashgate.
- Gibbs, Josiah Willard (1902) [1960]. *Elementary Principles in Statistical Mechanics*. New York: Dover.
- Howard, Don (2007). Reduction and emergence in the physical sciences: some lessons from the particle physics and condensed matter debate. en N. Murphy y W. R. Stoeger (eds.), *Evolution and Emergence: Systems, Organisms, Persons* (pp. 141-157). Oxford: Oxford University Press.
- Hull, David (1972). Reductionism in genetics: biology or philosophy? *Philosophy of Science*, 39, 491-499.
- Humphreys, Paul (1997). How properties emerge. *Philosophy of Science*, 64, 1-17.
- Humphreys, Paul (2008). Synchronic and diachronic emergence. *Minds & Machines*, 18, 431-442.

- Kim, Jaegwon (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95, 3-36.
- Kim, Jaegwon (2008). Reduction and Reductive Explanation. Is One Possible Without the Other? En J. Kallestrup y J. Hohwy (Eds.), *Being Reduced. New Essays on Reduction, Explanation and Causation* (pp. 93-114). Oxford: Oxford University Press.
- Kitcher, Philip (1984). 1953 and All That: A Tale of Two Sciences. *Philosophical Review*, 93, 335-373.
- Klein, Colin (2009). Reduction Without Reductionism: A Defence of Nagel on Connectability. *Philosophical Quarterly*, 59, 39-53.
- Lebowitz, Joel (1993). Boltzmann's Time's Arrow. *Physics Today*, 46, 9-32.
- Lebowitz, Joel y Penrose, Oliver (1973). Modern Theory. *Physics Today*, 26, 23-29.
- Lewis, David (1994). Reduction of Mind. En D. Lewis (ed.), *Papers in Metaphysics and Epistemology* (pp. 291-324). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lombardi, Olimpia (2003). El problema de la ergodicidad en mecánica estadística. *Crítica. Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 35, 3-41.
- Lombardi, Olimpia (2011). The Problem of Irreversibility, From Fourier to Chaos Theory: The Trajectory of a Controversy Space. En O. Nudler (ed.), *Controversy Spaces. A model of scientific and philosophical change* (pp. 77-102). Amsterdam: John Benjamins.
- Lombardi, Olimpia (2014a). Linking Chemistry with Physics: Arguments and Counterarguments. *Foundations of Chemistry*, 16, 181-192.
- Lombardi, Olimpia (2014b). The Ontological Autonomy of the Chemical World: Facing the Criticisms. En E. Scerri y L. McIntyre (eds.), *Philosophy of Chemistry: Growth of a New Discipline (Boston Studies in the Philosophy and History of Science)* (pp. 23-38). Dordrecht: Springer.
- Lombardi, O. y Labarca, Martín (2005). The Ontological Autonomy of the Chemical World. *Foundations of Chemistry*, 7, 125-148.
- Lombardi, Olimpia y Labarca, Martín (2006). The ontological autonomy of the chemical world: A response to Needha. *Foundations of Chemistry*, 8, 81-92.
- Lombardi, Olimpia y Labarca, Martín (2011). On the autonomous existence of chemical entities. *Current Physical Chemistry*, 1, 69-75.
- Lombardi, Olimpia y Pérez Ransanz, Ana Rosa (2012). *Los Múltiples Mundos de la Ciencia. Un Realismo Pluralista y su Aplicación a la Filosofía de la Física*. México: UNAM-Siglo XXI.

- McLaughlin, Brian (1997). Emergence and supervenience. *Intellectica*, 2, 25-43.
- Nagel, Ernst (1949). The meaning of reduction in the natural sciences. En R. C. Stauffer (Ed.), *Science and Civilization* (pp. 99-135). Madison: University of Wisconsin Press.
- Nagel, Ernst (1961). *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*. New York: Harcourt, Brace & World.
- Needham, Paul (2010). Nagel's analysis of reduction: Comments in defense as well as critique. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, 163-170.
- Neurath, Otto (1935) [1983]. The unity of science as a task. En M. Neurath y R. S. Cohen (eds.), *Otto Neurath. Philosophical Papers 1913-1946* (pp. 115-120). Dordrecht: Reidel.
- Nickles, Thomas (1973). Two concepts of intertheoretic reduction. *Journal of Philosophy*, 70, 181-201.
- O'Connor, Timothy y Wong, Hong Yu (2015). Emergent Properties. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2015 Edition). Obtenido de: <http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/properties-emergent/>
- Prigogine, Ilya y Stengers, Isabelle (1984). *Order Out of Chaos*. New York: Bantam Books.
- Primas, Hans (1981). *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism*. Berlin: Springer.
- Primas, Hans (1998). Emergence in Exact Natural Sciences. *Acta Polytechnica Scandinavica*, 91, 83-98.
- Putnam, Hilary (1975). Philosophy and Our Mental Life. *Mind, Language, and Reality: Philosophical Papers* (pp. 291-303). Cambridge: Cambridge University Press.
- Putnam, Hilary (1981). *Reason, Truth and History*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Putnam, Hilary (1990). *Realism with a Human Face*. Cambridge MA: Harvard University Press.
- Rohrlich, Fritz (1988). Pluralistic Ontology and Theory Reduction in the Physical Sciences. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 39, 295-312.
- Rueger, Alexander (2000). Physical Emergence, Diachronic and Synchronic. *Synthese*, 124, 297-322.

- Schaffner, Kenneth (1993). *Discovery and Explanation in Biology and Medicine*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Schaffner, Kenneth (2013). Ernest Nagel and reduction. *Journal of Philosophy*, 109, 534-565.
- Scerri, Eric y McIntyre, Lee (1997). The Case for the Philosophy of Chemistry. *Synthese*, 111, 213-232.
- Silberstein, Michael y McGeever, John (1999). The search for ontological emergence. *Philosophical Quarterly*, 49, 182-200.
- Sklar, Lawrence (1967). Types of Inter-Theoretic Reduction. *British Journal for Philosophy of Science*, 5, 464-482.
- Sklar, Lawrence (1993). *Physics and Chance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tolman, Richard (1938). *The Principles of Statistical Mechanics*. Oxford: Clarendon Press.
- Torretti, Roberto (2000). Scientific Realism and Scientific Practice. En E. Agazzi y M. Pauri (eds.), *The Reality of the Unobservable: Observability, Unobservability and their Impact on the Issue of Scientific Realism* (pp. 113-122). Dordrecht: Kluwer.
- Torretti, Roberto (2008). Objectivity: A Kantian Perspective. En M. Massimi (ed.), *Kant and Philosophy of Science Today* (pp. 81-95). Cambridge: Cambridge University Press.
- Uffink, Jos (2007). Compendium of the Foundations of Classical Statistical Physics. En J. Butterfield y J. Earman (eds.), *Philosophy of Physics* (pp. 923-1074). Amsterdam: Elsevier.
- van Riel, Raphael (2011). Nagelian reduction beyond the Nagel model. *Philosophy of Science*, 78, 353-375.
- Wimsatt, William (1976). Reductive Explanation: A Functional Account. En R. S. Cohen, C. A. Hooker y A. C. Michalos (Eds.), *PSA 1974: Proceedings of the 1974 Meeting of the Philosophy of Science Association* (pp. 671-710). Dordrecht: Reidel.