

Darwin y el desarrollo de otra ley de la termodinámica

León P. Martínez-Castilla y Mayo Martínez-Kahn¹

ABSTRACT (Darwin and the development of another Thermodynamics Law)

Stimulated by Darwin's year, the authors reviewed literature pertaining to biological thermodynamics. They found Rod Swenson's articles with his concept of the Law of Maximum Production of Entropy that may conduct to the possible establishment of the Fourth Law of Thermodynamics.

KEYWORDS: thermodynamics, law of maximum production of entropy (LMEP, MEP, MEPP), fourth law of thermodynamics, Darwin, evolution

Introducción

La celebración conmemorativa a nivel mundial de personajes, acontecimientos o documentos conocidos como "años de" tienen la virtud de estimular memorias históricas, provocar estudios, análisis y polémicas pero sobre todo motivar a la lectura y revisión de documentos que se generan por esa circunstancia. Esto ha sucedido, para los autores de este artículo, con el "año de Darwin" que celebró durante 2009 los 200 años de su nacimiento y los 150 años de la publicación de *El Origen de las Especies*. Nuestro interés se centró en la literatura que relacionara a la evolución biológica con la termodinámica.

Evolución y creacionismo

Desde hace años se ha estado planteando, en particular por organismos religiosos pero también en las universidades y los centros de estudio, una polémica inútil acerca del origen de la vida y su evolución. En ella han participado por el lado del llamado "diseño inteligente" escritores que, diciendo basarse en argumentos científicos, pretenden refutar conclusiones de la teoría de la evolución. Curiosamente es la termodinámica una de las disciplinas más empleadas en esa clase de alegatos, en especial los diversos conceptos de la entropía que los "creacionistas" saben que pueden generar polémica y confusión, afirmando equivocadamente, por ejemplo, que la aparición de la vida y su posterior evolución por el mecanismo de selección natural están en contradicción con la Segunda Ley de la Termodinámica. En sentido contrario, esto ha motivado que investigadores serios afinen su ingenio y encuentran formas novedosas para explicar los fenómenos de la naturaleza.

Aparece Rod Swenson

Al revisar algunos de los miles de artículos, páginas de internet y libros que se han publicado sobre Darwin, el darwinismo y la teoría de la evolución (clásica y moderna) nos encontramos con los de Rod Swenson y sus colaboradores (Swenson, 1997ab y 2000; Swenson y Turvey, 1991) y de quienes han aprovechado sus razonamientos. Aunque algunas de ellas no son publicaciones muy recientes parece que su importancia apenas se comienza a valorar.

Rod Swenson ha dirigido sus reflexiones especialmente a su campo de estudio, la filosofía de la ciencia en el campo de la teoría de la evolución; sin embargo, sus razonamientos y conclusiones resultan importantes para la termodinámica y todos los campos de aplicación de esta disciplina generalizadora.

Sus investigaciones se dirigen a demostrar que la evolución de las especies no se contradice con los postulados básicos de la termodinámica y que es posible el establecimiento de sistemas ordenados a partir de otros desordenados. Swenson comenzó a desarrollar sus ideas en 1987 y empezó a publicarlas al año siguiente. En sus artículos expone tanto aspectos teóricos y experimentales como filosóficos y revisa las ideas históricas al respecto en biología, física y termodinámica.

Para nosotros resultó notable que las elucubraciones de Swenson se manifestaran con un lenguaje que se acopla perfectamente al de las leyes de la termodinámica clásica, siendo el primero que lo hizo de forma clara y con ejemplos comprensibles, lo que nos llevó a escribir este artículo.

Lo que interesa para este escrito

En casi todos sus artículos Rod Swenson emplea dos ideas novedosas: la Ley de la Máxima Producción de la Entropía y la autocatacinética de los sistemas auto-organizados. Para el propósito de este escrito tomaremos la primera y dejaremos la segunda para una futura reflexión.

La Ley de la Máxima Producción de la Entropía

En sus elucubraciones, Swenson se percató de que la termodinámica clásica no contaba con un esquema teórico que

¹ Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Avenida Universidad 3000, 04510 México, DF. México.

Correos electrónicos: castilla@miranda.ecologia.unam.mx; mayo@servidor.unam.mx

Teléfono: (55) 5622 5377.

Fecha de recepción: 12 de agosto 2009.

Fecha de aceptación: 18 de febrero de 2010.

diera soporte a fenómenos, fácilmente observables en la naturaleza, que implican no solamente a la disipación entrópica sino la rapidez con la que ésta ocurre.

El postulado que Swenson propuso para lo que ha llamado la Ley de la Máxima Producción de la Entropía es el siguiente:

“Cuando un sistema puede seguir diversas trayectorias que le permitan minimizar el gradiente de potencial, o maximizar la entropía, seguirá aquella o aquellas que lo hagan con la mayor rapidez, dadas las restricciones.”.

Resulta fácil ver a nuestro alrededor numerosos ejemplos de fenómenos que muestran el cumplimiento de esta ley; en sus artículos Swenson incluye uno muy evidente:

En una cabaña, con calefacción, en medio de un bosque helado, el calor fluirá por conducción a través de las paredes. Imagínese ahora que se abre una puerta o una ventana, equivalente a quitar una restricción a la rapidez de disipación. Intuitivamente se sabe, y se puede comprobar experimentalmente, que se incrementará la rapidez a la que se minimiza el potencial. Aunque el enfriamiento continuará a través de las paredes, será más intenso por la puerta o ventana abierta. Cada trayectoria seguirá enfriando todo lo que pueda hasta el estado final de equilibrio pero lo hará con la mayor rapidez en conjunto.

Un ejemplo más obvio, aunque quizá menos impactante, es el de un tanque elevado con agua y dotado de dos tuberías de salida de diferente diámetro. El agua saldrá, hasta que el gradiente de potencial sea cero, cumpliéndose la Segunda Ley de la Termodinámica, pero lo hará más rápidamente por el tubo de mayor diámetro y, lógicamente, mucho más pronto que si sólo tuviera el tubo de diámetro pequeño. Una forma hermosa de entender lo anterior es contemplar las cascadas que tienen diversas obstrucciones al flujo de agua.

Una vez que se han comprendido estos ejemplos, todos vemos a nuestro alrededor innumerables casos similares y se comprende la trascendencia del postulado. Es la circunstancia, típica en el avance de la ciencia, en la que todo el mundo observa el fenómeno pero sólo unos cuantos perciben la trascendencia teórica.

Un corolario de la ley

Swenson y Turvey escriben: “Si el mundo físico —puede decirse la naturaleza— selecciona aquellas dinámicas que minimizan los potenciales con la mayor rapidez posible, dadas las restricciones, y si un flujo ordenado es más eficiente en reducir los potenciales que un flujo desordenado, entonces es de esperarse que se produzca orden porque un flujo ordenado produce entropía con mayor rapidez que uno desordenado”. El corolario, que para ellos ofrece una herramienta termodinámica que contribuye a proporcionar explicación de diversos aspectos de la teoría de la evolución, es más contro-

versial, al menos al tratar de usarlo como explicación del surgimiento de estructuras y procesos complejos u ordenados en los organismos vivos. Dicho de otra manera, no es evidente por qué un sistema ordenado incrementa la entropía más rápidamente que uno desordenado, así como tampoco es evidente por qué una entidad biológica capaz de establecer flujos que minimicen los potenciales a la mayor velocidad (flujos ordenados) prevalezca sobre otra en la que el flujo se diera más lentamente.

Sin embargo, hay fenómenos físicos y químicos en los que aparecen espontáneamente estructuras ordenadas cuando hay suficiente potencial —como el crecimiento de un cristal, los ciclones y tornados, y las reacciones químicas con varios productos en la que aquel que disipa más rápidamente la entropía tiene mayor rendimiento—, que se explican muy bien con el corolario. Un caso al respecto, que se ha mencionado en muchos artículos, es el de las celdas de Bénard; una buena descripción de este experimento la dan Prigogine y Stengers en su libro *Order Out of Chaos* (p. 142, 1984): “La ‘inestabilidad de Bénard’ es otro ejemplo notable de inestabilidad de un estado estacionario que da lugar a un fenómeno de auto-organización espontánea. La inestabilidad se debe a un gradiente vertical de temperatura en una capa horizontal de líquido. La superficie inferior del líquido se calienta hasta una temperatura mayor que la de la superficie superior. Como resultado de estas condiciones límite, se establece un *flux* permanente de calor que se mueve del fondo hacia arriba. Cuando el gradiente establecido alcanza un valor umbral, el estado de reposo del fluido —estado estacionario en el que el calor fluye sólo por conducción, sin convección— se hace inestable. Se produce una convección que corresponde a un movimiento coherente de conjuntos de moléculas, aumentando la rapidez de transferencia de calor. Por consiguiente, para valores dados de las restricciones (el gradiente de temperatura), la producción de entropía del sistema se incrementa; esto contrasta con el teorema de la mínima producción de entropía. La inestabilidad de Bénard es un fenómeno espectacular. El movimiento de convección que se produce se debe realmente a la organización espacial compleja del sistema. Millones de moléculas se mueven coherentemente, formando celdas de convección hexagonales de tamaño característico”.

Otro experimento que prueba el corolario es el juguete científico llamado “tubo de tornados”, que puede ser llevado al salón de clases como experimento de cátedra. Consiste en dos botellas de plástico de un litro unidas por un tubo que tiene un orificio de menor diámetro que el de las roscas de las botellas; en una de ellas se pone agua sin llenarla y se permite el flujo hacia la otra, el potencial hace que el agua fluya de manera lenta y tarda en vaciarse unos 20 minutos; se repite el experimento dando un giro a la botella superior formándose un torbellino que la vacía rápidamente, en unos dos minutos, por la aparición de una estructura más ordenada. En internet hay videos que muestran su funcionamiento, algunas variantes interesantes y cómo emplearse en demostraciones didácticas (<http://www.stevesplangerscience.com/product/1226>).

Antecedentes y discusión

Si bien es cierto que el concepto de producción de entropía y que la idea del tránsito de estructuras desordenadas hacia otras ordenadas fue planteada anteriormente por otros autores como Ziegler, Lotka, Jaynes o Prigogine (Martyushev y Selesnev, 2006) es evidente que fue Swenson quien los planteó por primera vez como una ley estructurada en términos termodinámicos y la llevó al estudio de la evolución biológica.

El que Swenson no sea especialista en termodinámica, o en las ingenierías mecánica o química, le lleva a afirmaciones que, desde nuestro punto de vista, es necesario revisar. Una es la simplificación del concepto de entropía al igualarla al grado o nivel de desorden, que es equivocado y ha llevado a confusiones didácticas. Hay que recordar que el propio Boltzmann no igualó entropía con desorden; su razonamiento tenía que ver con lo que llamó la probabilidad termodinámica, en la que la distribución homogénea de las partículas se tiene, no porque sea la más probable sino porque ofrece la máxima multiplicidad de distribución. Otra reclamo que se podría hacer a Swenson es que no haya considerado numerosos ejemplos en las ingenierías en los que se calcula la máxima rapidez de la disipación entrópica o de la reducción del potencial; como ejemplo puede verse el libro *The Dynamics of Heat* (Fuchs, 1996).

También es importante notar que el nombre de Ley de Máxima Producción de la Entropía resulta desafortunado, al menos en español, ya que no se conecta necesariamente con el tiempo de disipación de la entropía; para mayor claridad convendría llamarla Ley de la Máxima Rapidez de Producción de la Entropía.

El proceso creativo

Interrogado Swenson acerca del proceso creativo que lo condujo a postular la Ley de Máxima Producción de Entropía (Martínez-Kahn y Martínez-Castilla, 2010), contestó que dicho proceso se inició por su insatisfacción con la “inconmensurabilidad” (la idea de que el mundo físico y el biológico no pueden estudiarse con los mismos principios y las mismas leyes —como si se tratase de dos ríos, el de la física que fluye hacia abajo y el de la biología que fluye hacia arriba) que él no aceptaba. Lecturas de libros y artículos de Herbert Spencer (la transformación de lo incoherente a lo coherente y de lo homogéneo a lo heterogéneo), de Schroedinger (*¿Qué es la vida?*), Bertalanffy (Teoría General de Sistemas) y Clausius le inspiraron. Esto le llevó a un análisis sobre Boltzmann (la infinita improbabilidad de la vida), Prigogine (principio de producción de mínima entropía y sistemas auto-organizados), Lotka, etc.

Al ser, según sus propias palabras, teórico, experimentalista y práctico realizó el experimento de las celdas de Bénard en 1988 con el que comprobó la formación de estructuras ordenadas cuando a un sistema desordenado se le aplica un gradiente de temperatura.

De lo que no hay duda, es que antes de escribir su primer artículo sobre la Ley de Máxima Producción de Entropía, rea-

lizó muchos experimentos mentales —“Gedanken Experiments” les llamaron Bohr, Heisenberg y Einstein, quienes les daban mucho valor en el proceso creativo. Parece ser que Ørsted en 1820 fue quien primero empleó el término en alemán, como *Gedankenversuch*.

Ni los biólogos evolucionistas ni los termodinámicos y físico-químicos daban respuesta a sus inquietudes y la respuesta le vino de sus propias preguntas para resolver el problema de los dos ríos. Como dijo el pintor mexicano David A. Siqueiros: El verdadero maestro, el único y verdadero maestro es el problema.

Todas las leyes de la termodinámica se han establecido a partir de la observación de la naturaleza, de experimentos sencillos y de conclusiones al inicio cuestionadas y después aceptadas en su generalidad. Rod Swenson lo ejemplifica con los trabajos de Joule, Mayer, Clausius y Kelvin.

La idea de la Ley de la Máxima Producción de la Entropía sí es novedosa

Con lo anterior se tiene que reconocer que la idea de la máxima rapidez de producción de entropía sí constituye, para la termodinámica, un postulado comprobable. Conviene aclarar que en el campo de la estadística y de la teoría de la información E.T. Jaynes planteó desde 1957 un principio de máxima entropía, referido a la entropía de Shannon, y que existe un gran número de análisis matemáticos al respecto que podrían ser aprovechados por los termodinámicos para aceptar la validez del postulado.

En este punto no hay que olvidar tampoco los antecedentes históricos que han conducido a Swenson al establecimiento de su principio como son los trabajos de Onsager, Prigogine (Prigogine, 1984), Schroedinger, Bertalanffy, Brillouin, Ostwald, Lotka (Lotka, 1922) e incluso la sinérgica de Haken (Haken, 1984).

¿La Cuarta Ley de la Termodinámica?

El actual *corpus* de la termodinámica está constituido por leyes o principios que se intuyeron, observaron y experimentaron anteriormente en la física y la química. A partir de postulados generales, con deducciones matemáticas y a través del método científico se han ido asentando y validando esos postulados. El nuevo principio o ley tiene aún mucho por recorrer en ese aspecto, tiene que ser aceptado y probado experimentalmente una y otra vez pero, en nuestra opinión, es casi cierto que al final de este recorrido se tendrá un postulado general y su corolario como:

Cuarta Ley de la Termodinámica o Ley de la Máxima Tasa de Producción de Entropía o Ley de la Máxima Rapidez de la Entropía.— La entropía del Universo tiende a aumentar con la mayor rapidez posible, dadas las restricciones y posibles trayectorias.

Corolario de la Cuarta Ley de la Termodinámica.— Ya que los flujos y estructuras ordenadas disipan entropía con mayor rapidez, es de esperarse, considerando trayectorias y

restricciones, que en la naturaleza aparezcan esos tipos de flujos y estructuras.

La ley sigue el criterio de falsabilidad de Popper y, de acuerdo con Swenson, no es una parte de la segunda ley ya que ésta no habla de la rapidez, así que son dos leyes distintas y complementarias.

Las restricciones

Se puede ver fácilmente que la aplicación práctica de esta ley será el de buscar las restricciones y trayectorias de los sistemas en estudio. Los sistemas muy complejos tendrán muchas restricciones al cumplimiento de los flujos de disipación en aspectos físicos, químicos o biológicos.

Los ingenieros y los investigadores experimentales saben bien que el principal problema de la termodinámica en el aspecto práctico es el de las restricciones y trayectorias seguidas por la energía o la disipación de entropía.

La termodinámica y el tiempo

Ha sido frecuente escuchar en los cursos de termodinámica y leer en muchos libros que no le corresponde a esta disciplina el determinar caminos y tiempos de los procesos que estudia (aquello de que “no importa el camino recorrido sino sólo los estados inicial y final”). Con la ley de máxima rapidez de producción de la entropía, en el corpus de la termodinámica, se recuperan el tiempo, las trayectorias e incluso el nombre de termodinámica.

Importancia del efecto marginal en la rapidez del aumento de entropía

Al analizar el ejemplo de la casa en medio del bosque helado cabe la pregunta ¿por qué se continúa enfriando por las paredes si ya está la ventana abierta?, la respuesta es sencillamente porque en la suma de ambas difusiones el efecto marginal contribuye a la rapidez de aumento de la entropía. Precisamente esta idea de la marginalidad permitirá explicar la aparición de subproductos en las reacciones químicas, los fenómenos extraños en equilibrio de fases, las diferentes formas de cristalización y quizá la coexistencia, en un mismo ecosistema, de especies biológicas filogenéticamente cercanas.

Expresiones matemáticas y el lenguaje de Clausius

En varios artículos se pueden ver desarrollos matemáticos formales para la Ley de Máxima Producción de la Entropía (Martyushev y Selesnev, 2006); a continuación se muestra una interpretación sencilla, comparando ambas leyes.

(Se incluyen las expresiones en alemán porque a Swenson, en sus primeras lecturas le llamó la atención el hecho de que Clausius empleara el verbo “strebt” que no significa tender sino esforzarse (en inglés “strives” y no “tends”).

$$ds \geq 0$$

La entropía del Universo tiende al máximo
«Die Entropie der Welt strebt eine Maximum zu»

$$\frac{ds}{dT} \rightarrow \max$$

La producción de entropía del Universo tiende a crecer con la mayor rapidez posible

«Die Schnelligkeit der Entropie produktion der Welt strebt eine Maximum zu»

En ambas expresiones el caso de igualdad a cero corresponde al caso particular del equilibrio, tanto para la segunda ley como para la Ley de Máxima Producción de Entropía, que surge porque el potencial se reduce al mínimo o porque las restricciones impiden que ocurra el proceso.

El trabajo matemático de quienes empleen la Ley de Máxima Producción de Entropía o Cuarta Ley de la Termodinámica consistirá en encontrar la función que defina a la velocidad de la entropía con sus restricciones para el caso particular que se estudia y, mediante cálculo diferencial, encontrar la función o valor máximos.

S y TS (un paréntesis meramente termodinámico)

Al mencionarse la entropía (S) de forma conceptual o como generalidad es frecuente olvidar que dimensionalmente no es una energía y, para que lo sea, debe estar multiplicada por la temperatura (T). Así, la expresión básica de la termodinámica:

$$H = G + TS$$

puede interpretarse como H (entalpía, energía total) igual a G (energía libre de Gibbs, energía aprovechable) más TS (producto temperatura entropía, energía no aprovechada o disipada).

De acuerdo con lo anterior y con la Primera Ley de la Termodinámica, la energía permanece constante en el Universo, ya que si por algún proceso la energía libre (la útil) disminuye, el producto TS debe aumentar, no la entropía aisladamente, como a veces se estima. Este comentario puede ser útil para la correcta interpretación tanto de la Segunda Ley de la Termodinámica como de la cuarta que aquí nos ocupa.

Presente y futuro de la Cuarta Ley de la Termodinámica o Ley de la Máxima Producción de Entropía

En los últimos años se han producido ya un gran número de investigaciones y artículos que emplean la Ley de la Rapidez de la Entropía en los campos de química, fisicoquímica, metalurgia, cristalografía, hidrodinámica y, lógicamente, biología. Martyushev y Selesnev han publicado una revisión del estado del arte en *Physical Reports* en 2006 y se preguntan el porqué del retraso en su reconocimiento y empleo. En el libro de Kleidon y Lorenz (2005), como editores, sobre la termodinámica de no-equilibrio y la producción de entropía, se describen diversas aplicaciones de la ley.

Un ejemplo muy didáctico del empleo de la Cuarta Ley de la Termodinámica, que revisa el comportamiento de las celdas de Bénard con un programa de computación, se puede seguir en la tesis doctoral de David M. Hogg (1992).

Es probable que en el futuro haya muchas más investigaciones en todos los campos con base en esta concepción dinámica de la entropía y más artículos con el sustento o discusión de su validez con argumentos matemáticos.

Sería deseable, y muy conveniente, que en los futuros programas de los cursos y los libros de texto de termodinámica se encuentren referencias a la Ley o Principio de Máxima Producción de Entropía o Cuarta Ley de la Termodinámica.

Retornando a Darwin

Antes de explorar cómo es que se conecta la Cuarta Ley de la Termodinámica con la evolución biológica y el mecanismo de la selección natural, recapitemos brevemente algunas de las ideas centrales que hemos mencionado: una observación que se puede hacer en la naturaleza es que cuando exista un desequilibrio energético entre dos regiones de un sistema que estén en contacto entre sí, la energía fluirá desde la región con mayor energía hacia la que tenga menor energía a través de aquellas rutas que maximicen la velocidad con la que el equilibrio se restablece, dadas las restricciones de la estructura del sistema. La expresión formal de esta observación es de hecho la Cuarta Ley de la Termodinámica. Un corolario de esta ley es que la energía que fluye de una región a otra del sistema puede, en determinadas circunstancias, modificar la barrera que separa las regiones, de manera que se formen estructuras a través de las cuales el flujo energético es más rápido que el que se daba antes de que ocurrieran estas modificaciones estructurales.

Ahora bien, en teoría sería posible predecir con cierto grado de confianza la forma que tendrían estas conformaciones emergentes. (Estas conformaciones corresponden a lo que Prigogine y colaboradores han denominado “estructuras disipativas” (ver, *p. ej.*, Nicolis y Prigogine, 1977). Nótese que la aparición de estructuras progresivamente más ordenadas es consecuencia de que éstas aumentan la velocidad de disipación de los gradientes de energía, es decir, la aparición de orden es una consecuencia directa e inevitable de la termodinámica convencional y no algo infinitamente improbable o que “temporalmente” o “localmente” vaya en sentido opuesto al aumento de entropía.

Pero, ¿cuál es la relación de la Cuarta Ley de la Termodinámica con Darwin y la evolución biológica, especialmente la que ocurre por el mecanismo de selección natural? La perspectiva que queremos ofrecer es que al considerar a la Ley de Máxima Velocidad de Producción de Entropía, se hace evidente que la relación entre las leyes de la termodinámica y las ideas planteadas tempranamente en el *Origen de las Especies* es una relación sin tensión o contradicción: al considerar a la Cuarta Ley se vuelve claro que la termodinámica y la evolución biológica van en el mismo sentido. Para tratar de hacer más clara esta idea proponemos los siguientes ejemplos.

Los mohos mucilaginosos como ingenieros

La idea de la evolución por selección natural implica que los seres vivos son capaces, ya sea durante su ontogenia, o duran-

te la filogenia, de encontrar soluciones eficientes para el manejo de sus recursos. Un ejemplo de esto se encuentra en las redes que forman los mohos mucilaginosos (mixomicetes). En particular, estudios recientes sobre el moho *Physarum polycephalum* (Tero *et al.*, 2010) indican que este organismo relativamente simple es capaz de resolver problemas de diseño eficiente de redes de transporte. Durante una etapa de su ciclo de vida llamada plasmodio, este moho es una suerte de amiba macroscópica con millares de núcleos. Cuando está buscando alimento se mueve lanzando pseudópodos que se ramifican y anastomosan, y va creciendo en forma de una red interconectada de tubos. Al ir explorando el suelo de los bosques en los que vive, debe constantemente hacer *trade-offs* (sacrifica ciertos objetivos por otros) para balancear el costo, la eficiencia y la robustez de su red en expansión.

Como las redes formadas por *P. polycephalum* sirven para transportar nutrientes a través del organismo desde los lugares en los que los encuentra en el ambiente, Atsushi Tero y colaboradores (2010) se preguntaron si esas redes mostraban alguna similitud con las redes de transporte creadas por los humanos. En un experimento informado por ellos recientemente en la revista *Science* pusieron en una plantilla 36 hojuelas de avena (una de las comidas favoritas de *P. polycephalum*), colocándolas de forma que correspondieran a las ubicaciones relativas de las ciudades en el área alrededor de Tokio. Al echar a andar el experimento pusieron un plasmodio en el punto que correspondía al propio Tokio y observaron qué ocurría. Encontraron que a medida que crecía y colonizaba las fuentes de alimento, el moho iba formando una red que tenía una notable similitud con la red de ferrocarriles que conecta las ciudades alrededor de Tokio. Más aún, el plasmodio no había simplemente creado la red más corta posible para interconectar las fuentes de alimento, sino que había formado una red muy eficiente pero también muy robusta, puesto que incluía conexiones redundantes entre las hojuelas de avena (las “ciudades”) de manera que el transporte podía seguirse dando, casi con la misma eficiencia, si determinada conexión se rompía. En otras palabras, *P. polycephalum* había construido una red con eficiencia y resiliencia² similares a la de una diseñada por humanos.

Pensamos que esta historia tiene una liga con la Cuarta Ley de la Termodinámica porque entre más eficientemente use el moho sus recursos, más rápidamente estará produciendo

² Nota del Director: Resiliencia es un término que no aparece en el *Diccionario de la Real Academia de la Lengua*. Por ello es conveniente indicar que el *Diccionario Esencial de las Ciencias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* dice: «Fís. Capacidad de un sólido para recuperar su forma y tamaño originales, cuando cesa el sistema de fuerzas causante de la deformación». Dice uno de los autores (Martínez Castilla), “la resiliencia en Ecología se refiere a la capacidad de las comunidades de absorber (en el sentido de soportar) perturbaciones”. En *Psicología y Ciencias Socia-*

do entropía, de manera que la selección natural, al favorecer la aparición de un organismo como *P. polycephalum*, estará actuando en la misma dirección que las leyes de la termodinámica.

La competencia entre los virus

Los virus son entidades biológicas que pueden alcanzar enormes tamaños poblacionales al replicarse en un sólo individuo hospedero, y además su material hereditario sufre altísimas tasas de mutación. Por ejemplo, el virus de la inmunodeficiencia humana puede producir en una persona infectada de 10^9 a 10^{10} partículas virales por día y tiene una tasa de mutación de aproximadamente 3×10^{-5} mutaciones por base nucleotídica por ciclo de replicación (Robertson, Hahn y Sharp, 1995; Rambaut *et al.*, 2004; en comparación, la tasa de mutación promedio en el ser humano es de aproximadamente 2.5×10^{-8} mutaciones por base por generación). Estas condiciones propician que el efecto de la selección natural en la evolución de los virus sea especialmente importante, comparado con el de otros procesos, como la migración o la deriva génica. Entonces, el mundo de los virus es de una competencia feroz, en el que la más mínima diferencia en aprovechar eficientemente los recursos de la célula hospedera para replicarse se traducirá en que un virión transmita sus características a la siguiente generación o caiga en el olvido. Esto hace que las poblaciones de virus que podemos encontrar en un hospedero en casi cualquier momento estén exquisitamente adaptadas para usar los recursos de la célula con eficiencia. También quiere decir que los virus que podemos encontrar en una célula son los que más rápidamente producirán entropía, dadas las condiciones del ambiente.

El papel de la historia: la importancia de la contingencia

Los ejemplos que hemos mencionado sugieren que la evolución por selección natural a menudo conlleva un aumento a lo largo de las generaciones en la eficiencia en el uso de los recursos —y, por lo tanto, un aumento en la tasa de producción de entropía. No obstante, también sugieren que este aumento no es un proceso necesariamente lineal ni determinista, sino que se ve afectado por contingencias históricas y hasta por el azar. Por ejemplo, como hemos visto, los virus están permanentemente “tratando” de encontrar maneras de

usar más eficientemente el recurso “célula hospedera”, pero los organismos infectados por un virus también tratan de usar más eficientemente su energía, entre otras cosas, mediante la estrategia de tratar de deshacerse de los organismos que los parasitan, entre ellos los virus.

En el caso de algunos de los virus que atacan a los vertebrados, puede suceder que durante mucho tiempo la relación entre virus y hospederos sea un tipo de *steady state* (estado estacionario), en el que las poblaciones de virus “escapan” a la detección por parte del sistema inmune de los hospederos gracias a que por azar —y en el contexto de las altísimas tasas de mutación virales— puede aparecer un virus individual mutante cuyas proteínas de superficie no son reconocidas por los anticuerpos del hospedero y, por lo tanto, este individuo puede replicarse más eficientemente, por lo que su mutación llega a ser la forma dominante en la población; por otro lado, mientras dura ese *steady state*, los hospederos pueden escapar a la reinfección por virus a los que ya han sido expuestos gracias a que el sistema inmune aprende casi siempre a reconocerlos y puede impedir que nuevas poblaciones de virus con características conocidas se establezcan en un individuo sano.

Este *steady state* puede en teoría mantenerse indefinidamente, con ciclos de hospederos que van produciendo nuevos anticuerpos capaces de detectar variantes nuevas de virus y con virus que recurrentemente sufren mutaciones que les permiten escapar del sistema inmune y logran establecerse en un hospedero, hasta que aparecen nuevos anticuerpos capaces de reconocer a los nuevos virus. Sin embargo, pueden ocurrir situaciones que desestabilicen este *steady state*, llevando al sistema a otras dinámicas, incluyendo nuevos *steady states*. Por ejemplo, un virus puede adquirir una mutación o un nuevo arreglo genético que le confiera la capacidad de infectar a un hospedero al que previamente no atacaba —como pudimos atestiguar recientemente durante la emergencia del virus de la influenza porcina/humana. También es posible que el *steady state* se desestabilice a favor de los hospederos, como ocurrió cuando una bien coordinada campaña mundial de vacunación dio por resultado la erradicación del virus de la viruela.

Nos parece claro que hay una estrecha relación entre la evolución biológica y la Cuarta Ley de la Termodinámica pero en esta relación se vuelve evidente el papel de la contingencia histórica, tanto en evolución como en termodinámica. Lewontin y Levins (2007) han señalado que los seres vivos se encuentran en la intersección de un número muy grande de fuerzas débilmente determinantes, de manera que el cambio, la variación y la contingencia son las propiedades fundamentales de la realidad biológica. Creemos que la Cuarta Ley de la Termodinámica pone en evidencia que éstas son también propiedades de la termodinámica, lo que quizá la hace única entre las ciencias físicas.

Consideraciones finales

Al inicio de este artículo se dijo que encontramos las referencias de Swenson al revisar publicaciones sobre Darwin y la teoría de la evolución; el círculo se cierra con lo siguiente:

les se ha extendido el significado de la resiliencia a “la capacidad del ser humano para hacer frente a las adversidades de la vida, superarlas e inclusive ser transformado positivamente por ellas” (Grotberg, 1995), con lo cual se va más allá de la vuelta a lo original de la propiedad física (Rutter, 1993, menciona que “es una suerte de flexibilidad social adaptativa”). Dice el segundo de los autores (Martínez Kahn): “Si psicólogos, biólogos, metalúrgicos, ingenieros civiles, etc. hubieran estudiado el principio de LeChâtelier, comprenderían mejor la resiliencia”.

- a) El argumento de los creacionistas que proponen un “diseño inteligente” dice: “La Segunda Ley de la Termodinámica establece que la entropía del Universo tiene que acrecentarse; sin embargo, las entidades biológicas representan estructuras ordenadas y procesos altamente ordenados y, por lo tanto, violan la Segunda Ley”. Por supuesto el razonamiento es erróneo, porque la entropía del Universo puede aumentar sin que haya contradicción en que existan regiones o sistemas en las que disminuya localmente. También caen en el error de confundir entropía con desorden. Por supuesto tampoco aceptarán el papel que la Ley de Máxima Producción de Entropía pueda tener en la evolución. De hecho, la Cuarta Ley de la Termodinámica permite ver que no hay contradicción entre la evolución de organismos complejos y el aumento universal de la entropía, sino que incluso ambos fenómenos van de la mano o, mejor dicho, son dos manifestaciones de un mismo fenómeno. Para verlo de otra forma, considérese que la selección natural favorecerá que aparezcan estructuras y procesos progresivamente más complejos y, por otro lado, que surjan organismos que disipen energía de manera cada vez más rápida.
- b) Aunque ni Swenson ni sus predecesores como Lotka (1922) ni quienes han seguido sus razonamientos pretenden modificar la teoría darwiniana de la selección natural —sino más bien ofrecen herramientas para complementarla y comprenderla—, puede surgir la duda de que, de acuerdo con lo que señala el corolario arriba mencionado, se “requiera” una alta producción de entropía para que se manifiesten estructuras biológicas ordenadas, de acuerdo con trayectorias y restricciones. Considerando como restricción las contingencias históricas en la modulación de los resultados buscados por la naturaleza producibles por selección natural, la Cuarta Ley sólo proporciona la razón termodinámica para que éstos se produzcan a nivel bioquímico y confirma que no habría contradicción en que las mutaciones sean aleatorias y que se fijen por la mayor rapidez de producción de entropía con estructuras más ordenadas (y más complejas), tanto a nivel biológico como bioquímico (por variaciones de pH, T , p , concentración, etc.). Estas mutaciones podrán ser deletéreas, beneficiosas o neutras y se fijarán en individuos o especies por los procesos clásicos de la selección natural.

La termodinámica, con los planteamientos de Swenson, ofrece algunas argumentaciones interesantes que pueden integrarse en la Teoría Sintética Moderna de la Evolución. Asimismo, los artículos de Swenson, con sus descubrimientos, aportan una ruta interesante para contestar tres preguntas que Brooks y Wiley hacen en su libro *Evolution as Entropy* (Brooks y Wiley, 1986) y que resumen la heurística del tema:

1. ¿Por qué la naturaleza es ordenada y no caótica, si el mundo viviente está constantemente en un estado de transformación y es incapaz de una replicación perfecta?

2. ¿Por qué el mundo natural está ordenado de la manera en que lo está?
3. ¿Por qué los organismos tienen la forma que tienen?

Finalmente, es importante resaltar cómo a través de un proceso mental relacionado con otra ciencia se pueden extraer conclusiones para la termodinámica cuales la Ley de la Máxima Rapidez de Producción de la Entropía o Cuarta Ley de la Termodinámica y su corolario.

Agradecimientos

Agradecemos a dos árbitros anónimos cuyas observaciones contribuyeron a mejorar sustancialmente la calidad del presente trabajo.

Referencias

- Brooks, D. R. and Wiley, E. O., *Evolution as Entropy. Toward a Unified Theory of Biology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1986.
- Fuchs, H., *The Dynamics of Heat*, New York, U.S.A.: Springer-Verlag New York Inc., 1996.
- Grotberg, E. H., *A Guide to Promoting Resilience in Children: Strengthening the Human Spirit*. The Hague: the Bernard van Leer Foundation, 1995.
- Haken, H., *Secreto de los éxitos de la Naturaleza. Sinérgica: la doctrina de la acción de conjunto*. España: Editorial Argos Vergara, S.A., 1984.
- Hogg, W. D., *The Principle of Maximum Entropy Production in a Simple Model of a Convective Cell*. Thesis MIT, June, 1992.
- Kleidon, A. and Lorenz, R. D., *Non Equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy. Life, Earth and Beyond*. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- Lewontin, R. and Levins, R., *Biology under the influence: dialectical essays on ecology, agriculture and health*. New York: Monthly Review Press, 2007.
- Lotka, A. J., Contributions to the energetic of evolution and Natural selection as a physical principle, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, (8), 147-154, 1922.
- Martyushev, L. M. and Selesnev, V. D., Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology; *Physics Reports*, **426**(1), 1-45, 2006.
- Martínez-Kahn, M. and Martínez-Castilla, L., The Fourth Law of Thermodynamics: The Law of Maximum Entropy Production (LMEP): An Interview with Rod Swenson, *Ecological Psychology*, **22**(1), 69-87, January 2010.
- Nicolis, G. and Prigogine, I., *Self-organization in non-equilibrium systems*. New York: Wiley Interscience, 1977.
- Prigogine, I. and Stengers, I., *Order out of chaos. Man's new dialogue with Nature*. New York: Bantam Books, 1984.
- Rambaut, A., Posada, D., Crandall, K. A. and Holmes, E. C., The causes and consequences of HIV evolution, *Nature Reviews Genetics* **5**, 52-61, 2004.
- Robertson, D. L., Hahn, B. H. y Sharp, P.M., Recombination in AIDS viruses, *Journal of Molecular Evolution*, **40**(3), 249-59, 1995.

- Rutter, M., Resilience: Some conceptual considerations, *Journal of Adolescent Health*, **14**(8), 626-631, 1993.
- Swenson, R. and Turvey, M. T., Thermodynamic reasons for Perception-Action Cycles, *Ecological Psychology*; **3**(4), 317-348, 1991.
- Swenson, R., Spontaneous Order, Autocatakinetic Closure, and the Development of Space-Time, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 901, 311-319, 2000.
- Swenson, R., Thermodynamics, evolution and behavior. In: *The Encyclopedia of Comparative Psychology*, Greenberg and M. Haraway (eds.), New York: G. Garland Publishing, 217-226, 1997a.
- Swenson, R., Autocatakinetics, evolution and the law of maximum entropy production: a principled foundation towards the study of human ecology, *Advances in Human Ecology*, 6, 1-46, 1997b.
- Swenson, R.; Correspondencia con los autores.
- Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Beber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R. and Nakagaki, T., Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design, *Science*, 327, 439-442, 2010.
- Tubos de tornados. Video en la URL:
<http://www.stevespanglerscience.com/product/1226>,
 navegado el 16 de febrero de 2010.

Lectura recomendada

- Schneider, E. D. y Sagan, D., *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, ecología y evolución*. México: Tusquets Editores México, SA de CV, 2008.