

## LA ARQUEOLOGÍA COMO BIOLOGÍA

COLECCIÓN SPAL MONOGRAFÍAS ARQUEOLOGÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN  
Ferrer Albelda, Eduardo



CONSEJO EDITORIAL

Ferrer Albelda, Eduardo. Universidad de Sevilla  
Álvarez Martí-Aguilar, Manuel. Universidad de Málaga  
Álvarez-Ossorio Rivas, Alfonso. Universidad de Sevilla  
Belén Deamos, María. Universidad de Sevilla  
Beltrán Fortes, José. Universidad de Sevilla  
Cardete del Olmo, M<sup>a</sup> Cruz. Universidad Complutense de Madrid  
Garriguet Mata, José Antonio. Universidad de Córdoba  
Gavilán Ceballos, Beatriz. Universidad de Huelva  
Montero Herrero, Santiago C. Universidad Complutense de Madrid  
Pereira Delgado, Álvaro. Universidad de Sevilla  
Tortosa Rocamora, Trinidad. Instituto de Arqueología de Mérida, CSIC

COMITÉ CIENTÍFICO

Arruda, Ana Margarida. Universidade de Lisboa  
Bonnet, Corinne. Universidad de Toulouse  
Celestino Pérez, Sebastián. Instituto de Arqueología de Mérida, CSIC  
Chapa Brunet, Teresa. Universidad Complutense de Madrid  
Díez de Velasco Abellán, Francisco. Universidad de la Laguna  
Domínguez Monedero, Adolfo J. Universidad Autónoma de Madrid  
Garbati, Giuseppe. CNR, Italia  
Marco Simón, Francisco. Universidad de Zaragoza  
Mora Rodríguez, Gloria. Universidad Autónoma de Madrid  
Oria Segura, Mercedes. Universidad de Sevilla  
Vaquerizo Gil, Desiderio. Universidad de Córdoba

LUIS-GETHSEMANÍ PÉREZ-AGUILAR

# LA ARQUEOLOGÍA COMO BIOLOGÍA

Una introducción teórica a la  
arqueología darwiniana

---

SPAL MONOGRAFÍAS ARQUEOLOGÍA  
Nº XXXIV

---

  
u eus  
Editorial Universidad de Sevilla

Sevilla 2021

Colección: Spal Monografías Arqueología  
Núm.: XXXIV

COMITÉ EDITORIAL:

Araceli López Serena  
(Directora de la Editorial Universidad de Sevilla)  
Elena Leal Abad  
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez  
Rafael Fernández Chacón  
María Gracia García Martín  
Ana Ilundáin Larrañeta  
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado  
Manuel Padilla Cruz  
Marta Palenque Sánchez  
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda  
José-Leonardo Ruiz Sánchez  
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

© Imagen de cubierta: Jericó Mancera Jiménez.

© Editorial Universidad de Sevilla 2021  
c/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.  
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443  
Correo electrónico: eus4@us.es  
Web: <<https://editorial.us.es>>

© Luis-Gethsemaní Pérez-Aguilar 2021

Impreso en España-Printed in Spain  
Impreso en papel ecológico

ISBN: 978-84-472-3076-1  
Depósito Legal: SE 427-2021

Maquetación: Cuadratín Estudio  
Impresión: Podiprint

*A Luis Alberto Borrero, por su  
generosidad y toda su ayuda*



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	11
¿QUÉ ES LA VIDA? TERMODINÁMICA Y EVOLUCIÓN .....	15
Sobre ciencia, leyes y enunciados de la termodinámica.....	15
¿Qué es la termodinámica?.....	20
La termodinámica clásica .....	22
La termodinámica del no equilibrio.....	27
Termodinámica, ciclos y redes ecológicas .....	38
Termodinámica y complejidad .....	47
Termodinámica, selección natural y dirección evolutiva .....	52
Termodinámica y ciencias históricas .....	57
La etapa o posicionamiento «político-moralista» .....	57
La etapa o posicionamiento «heurístico».....	62
¿CÓMO CAMBIA LA VIDA? EVOLUCIÓN Y ARQUEOLOGÍA .....	71
Fijismo, transformismo predarwiniano y ciencias humanas .....	71
El evolucionismo darwiniano .....	78
Las críticas a la teoría de Darwin en el origen de la síntesis evolutiva .....	83
La nueva síntesis: evolución, conducta y cultura .....	87
Los procesos de selección.....	96
La Arqueología Darwiniana.....	103
La Arqueología Seleccionista (AS).....	103
La Ecología Evolutiva de la Conducta Humana (EECH) .....	109
La Teoría de la Herencia Dual (THD).....	111
La Teoría de Construcción de Nichos (TCN).....	114
Síntesis de posicionamientos en la Arqueología Darwiniana.....	118
Cultura «material» y unidades de selección: del artefacto al asentamiento .....	123
Darwinismo y análisis arqueológico del territorio .....	131
Paisaje y arqueología.....	133
Darwinismo y ecología del ¿paisaje? .....	137

EPÍLOGO: EPÍSTOLA A UN ESTUDIANTE DE ARQUEOLOGÍA CUALQUIERA.....	145
ADENDA: DE SIMIOS Y <i>CYBORGS</i> POSTMODERNOS. EL «ANTINATURALISMO» A DEBATE .....	149
CRÉDITOS DE LAS IMÁGENES.....	157
BIBLIOGRAFÍA.....	159



## Introducción

Aunque la arqueología darwiniana surgió entre finales de la década de 1970 y 1980, seguimos viendo con asombro cómo en España, pero también en otros países, esta no se explica ni en la mayoría de los manuales universitarios ni en las asignaturas donde se abordan contenidos de teoría arqueológica. Creemos que esto, al menos en lo que respecta a nuestro país, en buena parte se debe al desconocimiento que se tiene sobre la misma. Es posible que incluso se la confunda con la vertiente arqueológica de enfoques como el neoevolucionismo, la ecología cultural, el mal llamado «darwinismo social» –que más justamente debería denominarse «spencerismo»–, o con el evolucionismo de corte lamarckiano que predominó en la disciplina en el siglo XIX y parte del XX, y que muchos aún siguen vinculando erróneamente al pensamiento darwiniano (Pérez-Aguilar 2011).

Pero también pienso que, aquellos que conocen la arqueología darwiniana y que no la explican en sus manuales o en sus clases como un enfoque más, lo hacen de forma premeditada, porque se oponen diametralmente a esta corriente interpretativa que, lejos de lo que pudiera parecer, es practicada por muchos investigadores en el mundo. No informar al alumnado sobre esta perspectiva tal vez sea un intento de contrarrestar posibles nuevos partidarios atraídos por la fertilidad que este paradigma ofrece a la hora de explicar la realidad. A pesar de esto, existen honorables excepciones. Tal podría ser el caso del trabajo de Víctor M. Fernández Martínez (2019), autor que sin ser partidario de este enfoque ha hecho un loable esfuerzo por entenderlo y explicarlo sin dejar por ello de ser crítico. Esperamos con esta obra aclarar múltiples cuestiones que él plantea de una forma un tanto difusa y profundizar en otras tantas que no terminan de entenderse correctamente en su breve ensayo.

La arqueología darwiniana se ha desarrollado sobre todo en el ámbito anglosajón y en algunos países latinoamericanos como Argentina. Por suerte, durante mi formación como estudiante en la Universidad de Sevilla me crucé con el profesor José Luis Escacena. En el curso académico 2004/2005 él era el único representante de la arqueología darwiniana en España. Poco después su discípulo Daniel García Rivero contribuyó también a la investigación y a la enseñanza de este planteamiento teórico. Luego vinimos otros, y tras nosotros una nueva generación de arqueólogos formada en la Hispalense que está comenzando a investigar desde estas coordenadas teóricas. En el panorama internacional actual existen varios núcleos fuertes donde se trabaja desde esta perspectiva. Dentro de esta geografía mundial podemos situar a la ciudad de Sevilla, al estar allí la *alma mater* de esta escuela de arqueólogos españoles. Tanto es así que, hoy por hoy, la única universidad española que ofrece una asignatura de arqueología darwiniana es la de Sevilla.

Hemos titulado este libro *La arqueología como biología. Una introducción teórica a la arqueología darwiniana*. Pretendemos con ello un triple objetivo:

Primero rendir homenaje a Lewis R. Binford, quien en su momento se percató de que el objeto de estudio de la arqueología era realmente el ser humano, y no solo sus «culturas materiales». De ahí que reivindicara una «arqueología como antropología».

El segundo objetivo es poner de manifiesto en el título uno de los principios básicos de la arqueología darwiniana: que el ser humano es un animal más, y que tanto su evolución genética y somática como su evolución sociocultural pueden explicarse desde el mismo modelo teórico que los biólogos utilizan para analizar lo mismo pero en el resto de especies de seres vivos. Con esto, los arqueólogos darwinianos no solo se conforman con entender la «arqueología como antropología», sino que ambas disciplinas quedan disueltas en una de mayor envergadura: la biología. Así, se rehúye del antropocentrismo y del especismo propios de los enfoques teóricos de las humanidades, abogándose por lo que algunos han denominado «consiliencia» (Wilson 1999), «tercera cultura» (Brockman 2000) e incluso «nuevo humanismo» (Brockman 2007).

El último objetivo no se centra tanto en el título como en el subtítulo. En este libro tratamos de sintetizar una serie de cuestiones teóricas generales sobre la arqueología darwiniana, ilustrando ciertos aspectos con ejemplos de carácter breve pero aclaratorio. La intención es que aquellos que sientan interés en esta perspectiva puedan tener unas nociones elementales sobre la misma y profundizar en algunos conceptos necesarios para su comprensión. Como es evidente, en una obra que pretende ser introductoria no pueden ser abordadas todas las problemáticas y temáticas inherentes a la disciplina arqueológica. Afortunadamente existe un nutrido número de trabajos donde se tratan casos de estudio concretos y en los que se pueden ver, *in extenso*, cómo se aplican los principios teóricos de la arqueología darwiniana en términos analíticos e interpretativos. Somos conscientes de que muchos de estos otros trabajos no están en español, y quizás lo deseable sería que a esta obra siguiera una segunda parte donde se presente al lector de lengua castellana una recopilación de casos de estudio que se han venido haciendo en las últimas décadas desde este enfoque.

También queremos aclarar que la lectura del libro es accesible para aquellos que ya tengan un conocimiento mínimo de teoría arqueológica o antropológica, o que estén formándose en dicha materia. Es a este tipo de lector a quien va dirigida la obra. Aquellos que no tengan unas nociones elementales en estas cuestiones quizás deberían leer de forma previa algunos manuales generales que ya existen en el mercado editorial —en el epílogo mencionamos algunos de ellos—. Es importante tener presente este asunto, ya que en el libro no se desarrollarán las características generales de otras escuelas teóricas, aunque puntualmente se hagan referencias a ellas o a algunos de sus rasgos.

Quizás una de las características que distinguen nuestra forma de entender la arqueología darwiniana de los trabajos teóricos de otros colegas es que nosotros consideramos fundamental insertar también la realidad biológica dentro de un ámbito que la supera y que la integra: el de los sistemas energéticos. Por esto mismo la obra queda dividida en dos grandes apartados que tratan de articular su contenido desde lo más general a lo más particular. En la primera de ellas ofrecemos unas directrices que sirven para imbricar la evolución de los sistemas vivos con la evolución general de los sistemas termodinámicos en no equilibrio. En el segundo bloque del libro abordamos los principios fundamentales

de la teoría evolutiva darwiniana, para luego centrarnos en cómo esta se aplica para la comprensión de los rasgos culturales de las sociedades humanas. Es ahí donde entra en juego la arqueología darwiniana como estrategia de investigación, cuya meta es explicar la evolución de las sociedades y culturas humanas extintas desde principios biológicos.

No puedo terminar esta breve introducción a la obra sin mostrar mi agradecimiento a una serie de colegas y amigos: Livia Guillén Rodríguez, Ricardo J. Portillo Martín, Enrique García Vargas, Pablo Garrido González, Mario Delgado Canela, Jesús Rodríguez Mellado, José Antonio López García, Lourdes Martínez Correia, Álvaro Gómez Peña, Enrique y Manuel Ruiz Prieto, Manon Leroy, José Miguel Morillo León, Álvaro Viñas Martín, José Luis Escacena Carrasco, Daniel García Rivero, Eloísa Bernáldez Sánchez, Esteban García Viñas, María Coto Sarmiento, Cláudia Umbelino, Luis A. Borrero, Marcelo Cardillo, Vivian Scheinsohn, Federico Restifo, Hernán J. Muscio, Gustavo Barrientos, Alberto Conde Flores, Luis M. Carranza Peco, Carmen Ramírez Cañas, David Gordillo Salguero, Paloma Caballero Márquez, Valvanera Nieto Domínguez, Patricia Virino Gabella y Jericó Mancera Jiménez. Este último ha tenido además la gentileza de ilustrar la cubierta del libro. También debo agradecer el apoyo de todos mis compañeros del Instituto de Arqueología de Mérida (CSIC-Junta de Extremadura). Del mismo modo, deseo dar las gracias al equipo de profesionales de la Editorial Universidad de Sevilla que ha dado vida a este libro, muy especialmente a su antiguo director, José Beltrán Fortes, y a su nueva directora, Araceli López Serena.

En Mérida (Badajoz), a 27 de marzo de 2021



# ¿Qué es la vida? Termodinámica y evolución

## **SOBRE CIENCIA, LEYES Y ENUNCIADOS DE LA TERMODINÁMICA**

El historiador francés Marc Bloch inició su célebre obra *Introducción a la Historia* de la siguiente forma:

«Papá, explícame para qué sirve la historia», pedía hace algunos años a su padre, que era historiador, un muchachito allegado mío. [...] Ya tenemos, pues, al historiador obligado a rendir cuentas. Pero no se aventurará a hacerlo sin sentir un ligero temblor interior (Bloch 1982: 9).

La amplia mayoría de los investigadores dedicados al estudio del pasado humano ha experimentado alguna vez en su vida el escalofrío al que hace alusión Bloch cuando alguien le ha formulado semejante pregunta. No se pretende en estas líneas iniciales dar respuesta a tal cuestión. Sin embargo parafrasearemos a este célebre historiador para presentar otro planteamiento. No se despertarían muchas réplicas al afirmar que uno de los objetivos del historiador es el estudio del ser humano a lo largo del tiempo pasado. Tampoco se elevaría demasiada polémica al sostenerse que el hombre, al pertenecer al reino animal, es un ser vivo. Sin embargo, llegados a este punto, pongamos sobre la mesa la siguiente pregunta: ¿para qué sirven los seres vivos? Si un niño, en su inquietud por saber, formulase semejante cuestión, el escalofrío que sentiría el interrogado sería todavía mayor. ¿Cómo podemos estudiar el pasado del ser humano sin antes esforzarnos por comprender qué es la vida y para qué sirve? En nuestra opinión, los arqueólogos, historiadores o antropólogos que se excusan con argumentos tales como «eso pertenece al ámbito de otras ciencias» no hacen otra cosa que construir la casa por el tejado, pues consideramos que un paso metodológicamente prioritario en todo proceso de investigación es definir el objeto de estudio.

En última instancia –o en primera, según se mire–, el ser humano es el objeto de estudio de la disciplina arqueológica. Como miembros del reino animal, para entender nuestras funciones como seres vivos debemos contemplar nuestra realidad sin perder de vista una serie de cuestiones que nos lleva de lleno a adoptar una perspectiva termodinámica y biológica, y no por capricho, sino porque se trata de un enfoque que nos permite dar respuestas parsimoniosas y científicas a tales preguntas: ¿Qué es el ser humano? ¿Qué son los animales? ¿Qué son los seres vivos? ¿Para qué sirven los seres vivos, cuál es la función más elemental y básica de los mismos? (cf. Scheinsohn 2008: 133-134).

El análisis darwiniano de la vida tiende a expulsar de su bagaje terminológico expresiones tales como «para qué». Tratar de exiliar frases de este tipo supone guardar gran coherencia con la teoría de la evolución de Darwin, ya que no podemos definir algo en

términos absolutos a través de su función. En unas circunstancias dadas ese algo puede tener unas funciones concretas, pero en otro contexto la selección natural puede hacer que la utilidad sea distinta. Pensemos por ejemplo en los huesos del oído de la mayoría de los vertebrados terrestres. Estos evolucionaron a partir de antiguas piezas mandibulares de una especie de pez del Devónico llamada *Panderichthys* (Brazeau & Ahlberg 2006). También los cambios morfológicos que definen la pelvis y las aletas de este pez parecen haber sido determinantes en el posterior sistema de locomoción terrestre de los tetrápodos o vertebrados de cuatro patas (Boisvert 2005; Boisvert 2009).

Por tanto, un investigador darwiniano no debe en principio definir qué es algo a través de su funcionalidad, puesto que el modelo evolutivo darwiniano, a diferencia del lamarckiano, no es teleológico. Pero llegados a este punto los científicos darwinianos podemos encontrarnos ante un apuro epistémico. En 1943 el físico Erwin Schrödinger definió qué es la vida a través de su función, y hoy por hoy esta es la única respuesta aceptada por la ciencia. Ante ello, se podría llegar a pensar en la existencia de un antagonismo, fruto quizás de lecturas distintas de la realidad biológica, la efectuada por los biólogos y la que realizan los físicos. Sin embargo, como se espera demostrar, no existe tal contradicción.

Uno de los grandes biólogos evolucionistas del siglo XX, Ernst Mayr (2006: 59-92), hablaba de la existencia de tres tendencias relativas a los tipos de cambios. La primera de ellas es la que se denomina «teleológica», y hace referencia a las acciones intencionales que se efectúan desde la conciencia para conseguir un fin concreto. Por ejemplo, si somos aficionados a realizar barbacoas podemos decidir hacer un asado con nuestra carne favorita para alimentarnos. Otro tipo de cambio es el que se denomina «teleonómico». Se refiere a grupos de tareas involuntarias que resultan de anteriores decisiones conscientes. Si comemos la carne, queramos o no nuestro estómago segregará jugos gástricos para que el proceso de nutrición pueda llevarse a cabo. Este tipo de fenómeno es involuntario, pero ocurre como consecuencia inmediata de un proceso que se ha podido iniciar conscientemente. De otro lado, el tercer tipo al que se refiere Mayr es el de las llamadas acciones «teleomáticas». En ellas la voluntad y la intencionalidad no tienen cabida, puesto que son imposiciones de una ley natural. Siguiendo con el mismo ejemplo, las leyes de la termodinámica nos imponen disipar energía a través de nuestras células. Por tanto, nos encontraríamos ante un caso en el que voluntaria y conscientemente hemos asado nuestro tipo de carne favorita para que involuntariamente nuestro organismo la procese a través de los distintos órganos que componen el sistema digestivo. Pero tras tales fenómenos teleológico y teleonómico se encuentra uno de mayor trascendencia, de carácter teleomático: la necesidad de incorporar energía, que es imperativo estructural del segundo principio de la termodinámica.

Cuando se plantea la cuestión «para qué sirve la vida» no se entra en contradicción con la teoría darwiniana. Los lamarckistas y los fijistas-creacionistas suelen dar respuestas teleológicas que no tienen cabida en el seno de la ciencia. Sin embargo, un biofísico puede esgrimir planteamientos teleomáticos, esto es, explicar la función última<sup>1</sup> y

---

1. Queremos despojar de sentido metafísico el uso que hacemos del concepto «causa» o «función última». Con ello no aludimos a razones que están más allá de los procesos en sí mismos. Nos referimos más bien a las causas profundas o estructurales a partir de las cuales se vertebra el dinamismo de la realidad física, y que pueden ser observadas a nivel fenomenológico, estudiadas y cuantificadas (cf. Tyrantia 2009: 87).

elemental de algo siempre y cuando dicho razonamiento quede avalado por la acción de una ley natural. Es más, el modelo evolutivo darwiniano, a nuestro modo de ver, es el único que no contradice las leyes de la termodinámica, sino que confluye y se fusiona con estas de forma armoniosa.

Para poder comprender cómo evolucionaron las sociedades y culturas humanas en cualquier zona geográfica y en cualquier periodo tenemos primero que examinar cuestiones referentes a sus funciones más básicas sin ir en contra de los principios de otras disciplinas científicas. En este sentido, Leonardo Tyrtania nos comenta que:

Para entender qué es la evolución no hace falta ser especialista en física teórica, pero sí es necesario entender *qué significa* la segunda ley (principio del aumento de entropía). Si no se toma en cuenta la naturaleza entrópica de los procesos de expansión de los sistemas [...] se corre el riesgo de contemplar un mundo irreal donde el consumo de energía no tiene consecuencias y donde todo parece un don de la naturaleza que no hace falta retribuir. Un paraíso, pues. Los seres humanos nos hemos conducido siempre como invitados a un «banquete gratuito» [...]; sin embargo, nada hay gratis en la vida (Tyrtania 2007: 17).

Desde el comienzo hemos dejado claro la corriente teórica con la que trabajamos: la darwiniana, cuyos principios elementales se desarrollarán más adelante. Precisamente por enmarcarse nuestra labor dentro de la denominada arqueología darwiniana, compartimos y hacemos nuestra la idea de *consilience*. Este término es usado por Edward O. Wilson (1999) para aludir a la unificación de la ciencia desde la base de la aceptación de un mundo real a cuyo conocimiento es posible aproximarse desde el método científico. La consiliencia no debe confundirse con la interdisciplinariedad, ya que no se refiere al estudio de una misma realidad desde diferentes ramas del saber, sino a la interconexión o convergencia teórica y metodológica de tales «disciplinas para crear un terreno común de explicación [...] de manera que de una disciplina a otra fluya un sólido juicio [...] [sobre la base de]<sup>2</sup> un corpus común de principios abstractos y pruebas evidenciales» (Wilson 1999: 15 y 18). En definitiva, es una forma de diluir o romper las fronteras entre las ramas del conocimiento.

El ejercicio de la consiliencia nos puede permitir hacer uso tanto de la biología como de la termodinámica a modo de conocimientos aplicados al estudio de las sociedades y culturas humanas. Pero también conviene tener presente el grado de consiliencia de cara a validar la rigurosidad científica de cualquier investigación. Si a la hora de esbozar una hipótesis de trabajo o de generar un modelo explicativo en nuestra rama tenemos que tal propuesta no contradice las aportaciones teóricas de otros campos del conocimiento, nuestra propuesta tendrá más solidez que si no lo hiciera. Esto nos recuerda las palabras que a mediados del pasado siglo dijo el astrofísico Arthur S. Eddington:

Si alguien sugiere a usted que su teoría favorita del universo está en desacuerdo con las ecuaciones de Maxwell, tanto peor para estas ecuaciones. Si llega a comprobarse que la observación las contradice, será el caso de recordar que a veces los experimentadores adulteran los

---

2. De aquí en adelante, cuando en las citas literales de textos de otros autores se incluyan notas entre corchetes, estas son nuestras.

hechos. Mas si la teoría suya va contra el segundo principio de la termodinámica, entonces no podré darle ninguna esperanza y tendrá usted que sentirse profundamente humillado (Eddington 1954: 101).

El concepto de ciencia de Eddington podría definirse dentro de la categoría de «realismo ingenuo» (cf. Diéguez 2012), pues asume optimistamente la ecuación «segundo principio de la termodinámica = verdad absoluta e incuestionable». Nuestra postura al respecto podría definirse dentro de un marco de ciencia popperiano o de realismo instrumentalista. No obstante, si consideramos que de las palabras de Eddington se desprende una lección relevante en cuanto a la consideración del enunciado de la segunda ley como «validador» epistémico: resulta conveniente desechar cualquier propuesta que no incorpore su aplastante lógica explicativa. Esto lo llevan a la praxis por ejemplo las oficinas de patentes, donde se aplican restricciones basadas en profundos fundamentos científicos.

En lo relativo a dicho enunciado, hoy por hoy nadie ha podido demostrar su violación. Cuando algún investigador ha sostenido tal cosa por regla general no ha puesto luego los avales experimentales de su afirmación a disposición de la comunidad científica para que los examine, o bien ha ocurrido que, tras ser estos examinados, se ha podido ver que realmente no suponen un incumplimiento de dicho principio. Curiosamente casi todos los años saltan a la prensa no científica noticias que informan sobre «descubrimientos» que dicen demostrar la violación de dicha ley. Evidentemente de ser esto cierto cabría esperarse que su «descubridor» recibiera como mínimo un premio nobel en física por tan magno hallazgo, algo que extrañamente no suele ocurrir. Además, la violación de dicha ley una única vez sería razón suficiente para su cuestionamiento, y no haría falta que nuevos «investigadores» persistieran en demostrar lo que ya ha sido demostrado; pero vemos cómo año tras año noticias dignas de prensa rosa siguen insistiendo en lo mismo.

Los partidarios del relativismo filosófico podrían mostrarse escépticos respecto a la consideración de la segunda ley de la termodinámica como validador epistémico, incluso ante el propio concepto de «ley». Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la segunda ley no es una ley entendida al estilo newtoniano, que describe la dinámica de un universo como si del mecanismo de un reloj en eterno funcionamiento se tratase, idea que asumió el positivismo del siglo XIX. Fue precisamente en el campo de la termodinámica donde esta concepción cambió al plantearse el hecho de la indeterminación entrópica, pudiendo causar entre muchos «perplejidad una “ley” que deja sin determinar ninguna trayectoria en especial» (Tyrtania 2009: 18): la única trayectoria sería la tendencia al desorden debido al aumento de la entropía.

Pese a ello, el relativismo filosófico se ha conformado en líneas generales como un posicionamiento que niega la existencia de una serie de principios o leyes por las que se rige el universo<sup>3</sup>, llegándose incluso hasta el extremo de poner en duda la existencia de la realidad misma –antirrealismo–. Sin incluir la profundidad y los argumentos de muchos filósofos, los razonamientos más simples de este posicionamiento suelen entender «que

---

3. La coherencia de todos esos principios fue denominada *urgleichung* por Werner K. Heisenberg, un proceso de unificación del conocimiento científico capaz de dar explicación a cualquier fenómeno del universo, de ahí que actualmente en física se le llame a dicha aspiración epistémica «teoría del todo» (cf. Thirring 1999: 181-183 y 186-187).



todo es relativo», idea que se contradice así misma si aplicamos su lógica al propio enunciado, que aspira a constituirse como un axioma no relativo (Wilson 1999: 62).

Nosotros no asumimos el concepto de «ciencia» postmoderno, pues consideramos que esta vertiente filosófica fue herida de muerte a mediados de la década de 1990 por la obra de Alan Sokal y Jean Bricmont titulada *Imposturas intelectuales* (2008). Sin embargo, esta crítica ha sido infravalorada en el Viejo Continente –cuando no ocultada–, y el pensamiento constructivista ha seguido campando a sus anchas hasta el punto de calar en el mundo de la física, y concretamente en lo que aquí nos atañe en el de la termodinámica. Un claro ejemplo de ello lo constituye Arieh Ben-Naim (2011: 126 y 217-219), quien rechaza el carácter absoluto de la segunda ley. En su argumentación vemos reflejada una concepción postmoderna de la ciencia: son los experimentadores los que permiten dar solidez a la segunda ley, pero eso no quiere decir que no quepan excepciones dentro de un concepto infinito de tiempo. Esto lleva a dicho autor a decir:

¿Podemos realmente afirmar que una ley física es absoluta? Sabemos que estas leyes no han dejado de cumplirse en los pocos milenios durante los cuales se han registrado observaciones. [...] pero no podemos afirmar que dichas leyes han sido *siempre* las mismas, o lo seguirán siendo en el futuro, sin excepciones. [...] De hecho no hay ninguna razón, ni teórica ni experimental, para creer que las leyes de la física son absolutas (Ben-Naim 2011: 218).

Dicha reflexión puede aparentar tener una abismal lógica, sin embargo tras estas palabras radica un problema de fondo terminológico, conceptual y epistémico que debe aclararse. La crítica más sencilla que se podría ofrecer al argumento de Ben-Naim es que si bien no hay razones «para creer que las leyes de la física son absolutas», tampoco las hay para entender que no lo son. Sin embargo esto resultaría caer en la misma trampa, una afirmación no cognoscitiva. Desde un tono humorístico, este tipo de lógica nos podría llevar a plantear que los primatólogos no han observado hoy por hoy a un chimpancé hablar en latín mientras se pone una corbata y gafas de sol, lo cual no quiere decir que tal hecho no pudo llegar a darse o no pueda llegar a ocurrir. Simplemente es algo que no se puede conocer, y por tanto no es abarcable desde el método científico.

De otro lado, el problema radica no tanto en la existencia de la realidad misma –y cuyo cuestionamiento pertenecería más bien al ámbito de la ciencia ficción–, sino en la forma que disponemos para aproximarnos a su conocimiento. Para explicar la realidad la humanidad, en su ansia por conocer, ha ido desarrollando varios métodos, entre los que se encuentra el científico. Independientemente del método, se asume que la realidad tiene una forma última y subyacente de ser, de funcionar, una serie de patrones que permite explicarla, porque son principios elementales, son las reglas por las que se rige la realidad en su dinámica. Estas reglas últimas que explican el dinamismo de lo existente reciben el nombre de leyes, y deben ser universales, absolutas e inmutables. Ben-Naim está confundiendo dos cosas diferentes: las leyes con los enunciados que, desde el método, se hacen de ellas. Lo primero es absoluto, lo segundo no.

Si los enunciados se modifican con el tiempo es precisamente por la imperfección del método, por imprecisiones técnicas y otras tantas variables (cf. Holton & Brush 1993: 312-314). Así, en esta primera parte del libro observaremos cómo los enunciados clásicos de las leyes de la termodinámica explican peor el universo que los postulados de la

denominada termodinámica del no equilibrio o de sistemas abiertos, enunciados que perfeccionan a los anteriores. Sin embargo, e independientemente a los enunciados, las leyes de la termodinámica existen: son procesos naturales que ocurren y que pueden constatare empíricamente. Precisamente el éxito del método científico ha radicado en eso mismo, en su capacidad para ir reciclando los enunciados e ir avanzando cada vez más en la explicación del mundo cognoscible.

Las palabras de Eddington deben tenerse en consideración si se tiene en cuenta que, hoy por hoy, el enunciado de la segunda ley de la termodinámica constituye la mejor formulación que desde el método científico se ha hecho de una ley. No existen avales empíricos que la contradigan, especialmente si consideramos las reformulaciones que en el campo de la termodinámica tuvieron lugar a partir de los planteamientos de Schrödinger, de los que luego hablaremos. Por tanto, y desde un posicionamiento instrumentalista, se considera la tremenda utilidad de emplear este enunciado como un contundente «validador» epistémico a la hora de calibrar la calidad científica de un modelo explicativo.

Dicho todo esto, conviene retomar la cuestión planteada al principio: ¿qué es la vida? Retengamos la respuesta que, con un lenguaje técnico, nos ofrece Alfred J. Lotka, quien llegó a definirla como «un proceso disipativo [de energía] metaestable. [...] Se trataba [la vida] de un fenómeno bioenergético y biofísico, y por tanto termodinámico» (Schneider & Sagan 2009: 115). Tal afirmación puede llegar a resultar en principio incomprensible y simplista, pero sintetiza a la perfección el contenido de una serie de cuestiones que iremos desarrollando. Por tanto, no debe perderse de vista tal enunciado, ya que será más coherente y comprensible una vez que se expongan tales problemáticas.

## ¿QUÉ ES LA TERMODINÁMICA?

Desde el punto de vista de la ciencia, los seres vivos no son otra cosa que materia orgánica. De otro lado, toda la materia existente en el universo, incluida la orgánica, es un estado de la energía. Ello se desprende de la célebre ecuación de Albert Einstein, según la cual la energía es igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado,  $E = MC^2$ . En definitiva, se quiere decir con esto que los organismos vivos somos, en última instancia, un sistema energético. Por tanto, no solo somos objeto de estudio de la biología, sino de aquella disciplina científica encargada de analizar todo lo relativo a los procesos de transferencias energéticas: la termodinámica.

Pero, ¿qué es la energía? En la inmensa mayoría de los libros de física la energía es definida como «la capacidad de realizar trabajo» (Schneider & Sagan 2009: 56), y el trabajo «es [el] movimiento contra la acción de una fuerza» (Atkins 2008: 35). Existen muchos tipos de trabajo, empero, solo siete tipos de energía, pudiéndose experimentar transformaciones que hacen que de una clase de energía se pase a otras. Las siete variedades de energía son: la cinética, la potencial gravitatoria, la magnética, la eléctrica, la química y la de los enlaces nucleares. En tales libros de texto se trata de dejar claro que tanto el calor como el trabajo son procesos de transferencias energéticas. Sin embargo, esta definición decimonónica de la energía tendría que haberse reformulado a partir del enunciado de la segunda ley de la termodinámica –tal y como luego se deducirá–, pues no toda la energía sirve para realizar trabajo. El mismo Max Planck propuso, a comienzos del

siglo XX, la necesidad de modificar el concepto clásico de energía. En razón de ello, se han puesto sobre la mesa varias alternativas sobre las que hoy se sigue debatiendo, siendo la más genérica aquella que plantea que la energía es la capacidad de los sistemas para producir cambios a partir de las interrelaciones existentes entre unos y otros. En este sentido, la energía no es una propiedad a la que puede atribuirse un valor constante o en términos absolutos, pues solo es posible cuantificar las variaciones que tienen lugar dentro de procesos concretos (Doménech *et al.* 2003: 292-302; Primero & Gracia 2019: 37).

La termodinámica es una disciplina científica tradicionalmente inserta dentro del área de estudio de la física. Sin embargo, al menos desde la década de 1940 esta ha sido de notable interés dentro de la biología de cara a la comprensión de los sistemas vivos. Este ramal, que podríamos llamar biotermodinámica o termodinámica de la vida, se ha hecho un hueco dentro de lo que ha venido denominándose biofísica.

El término «termodinámica» proviene del griego *θερμo* (termo), que significa «calor», y *δύναμις* (dínamis), que se define como «fuerza», «movimiento» o «cambio». Su etimología viene a corresponderse con su ámbito de estudio, pues, aunque el calor es una transferencia energética, esta disciplina se ocupa de la comprensión de los «flujos» de energía, es decir, de cómo esta se transforma (Jou Mirabent *et al.* 1995: 191).

Los enunciados de sus leyes o principios se apoyan en la constancia fenomenológica de una serie de hechos que son inducidos y generalizados al resto de sistemas del universo, puesto que el comportamiento analizado y descrito se ha verificado experimentalmente siempre. No se trata por tanto de un modelo hipotético-deductivo que pretende explicar un fenómeno de la realidad, sino de la teorización inductiva a partir de sistemas reales (Pohl 2009: 131).

Algunos autores vinculan el comienzo de la termodinámica a la figura de Galileo, quien a finales del siglo XVI hizo una serie de experimentos para elaborar un termómetro mediante un recipiente con agua, un tubo y un bulbo de vidrio (Martínez Herranz 1992: 575). Sin embargo, como disciplina científica su nacimiento ha sido asociado al físico francés Sadi Carnot, quien para mejorar la eficiencia de las máquinas de vapor hizo una serie de observaciones que resultó fundamental para el enunciado de la segunda ley de la termodinámica. Ya de forma póstuma, en 1878, su hermano Hippolyte Carnot trató de convencer a la Academia Francesa de Ciencias a partir de una serie de notas inéditas que su pariente también había esgrimido contundentes ideas relativas a la primera ley. Sin embargo, el hecho de que estas no fueran comunicadas a la comunidad científica hizo que realmente no fueran influyentes sobre su formulación (Erlichson 1999: 191).

En su obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu sur les machines propes a développer cette puissance* (1824) una de las observaciones que Carnot hizo fue que el calor siempre «flúa»<sup>4</sup> de lo caliente a lo frío y no al revés<sup>5</sup>, pudiéndose emplear dicho

---

4. Entiéndase esta palabra en su sentido metafórico, ya que el calor no es un fluido. La temperatura, cálida o fría, es el resultado de átomos a distintas velocidades, es decir de la energía cinética (Atkins 2008: 31 y 40-43; Ben-Naim 2011: 137-138 y 182-183; Doménech *et al.* 2003: 297-298).

5. De hecho, posteriormente William Thomson, mejor conocido como lord Kelvin, añadiría que «Es imposible que una máquina, sin ayuda de un agente externo, transfiera calor de un cuerpo a otro más caliente» (traducción al español a partir de Thomson 1882 [1851-1852]: 181). Piénsese por ejemplo en un frigorífico, que para enfriar su contenido exporta al medio el calor del mismo gracias a la energía recibida de una fuente de alimentación (Atkins 2008: 67 y 86; Ben-Naim 2011: 28-29; Gribbin 2006: 51).

principio para obtener potencia. Así, la máquina de vapor no podía entenderse sin una caldera caliente y un radiador frío. La segunda de las observaciones que efectuó el fundador de la termodinámica es que era imposible reciclar el calor de forma eterna para convertirlo en trabajo, ya que en cada transformación energética tendía a perderse o a disiparse parte del mismo (Atkins 2008: 63-64; Holton & Brush 1993: 425-426; Schneider & Sagan 2009: 70). A Carnot le tomó el relevo una serie de físicos que siguió profundizando y matizando tales principios, configurando con el tiempo los enunciados de las leyes de la termodinámica.

## LA TERMODINÁMICA CLÁSICA

La formulación de la ley cero de la termodinámica se postuló a principios del siglo XX, cuando las dos primeras leyes estaban ya enunciadas, de ahí que a este principio se le decidiera llamar «ley cero», pues pese a ser posterior en el tiempo es elemental para la comprensión de los otros. En sus orígenes se formuló en torno a estudios físicos de la temperatura, y plantea el concepto de equilibrio termodinámico intersistémico: si dos sistemas<sup>6</sup> energéticos, A y B, están en contacto a través de sus fronteras y no varían sus propiedades es porque existe un equilibrio entre ambos en cuanto a sus propiedades. Si el sistema B entra en contacto con un tercero, C, y se observa el mismo equilibrio, entonces A y C también lo están (Atkins 2008: 17-21) (fig. 1).

El enunciado de la primera ley de la termodinámica –generalización del principio de conservación de la energía– postula que la energía ni se crea ni se destruye, sino que está en constante transformación. Podría considerarse la obra de Hermann von Helmholtz, publicada en 1847 bajo el título *Über die Erhaltung der Kraft*, la precursora del principio de conservación de la energía, ya que en ella se hacía hincapié en cómo las «fuerzas» no se aniquilaban dentro de un sistema cerrado, sino que se transformaban (Pohl & Cala 2010: 40).

David Jou Mirabent *et al.* (1995: 204-205) comentan acertadamente que este primer principio solamente dicta qué procesos son posibles y cuáles no, sin embargo nada añade sobre el sentido de los mismos, hecho que vino a matizar la segunda ley, sobre todo a partir de los enunciados de Rudolf Clausius y lord Kelvin, introductor, este último, del concepto de entropía<sup>7</sup>.

Esta misma idea ha sido recalcada por otros científicos, tales como los químicos Peter Atkins (2008: 61) y Arieh Ben-Naim (2011: 153). El primero de ellos comenta que «La segunda [ley] tiene una importancia capital en el conjunto de la ciencia, y por ello en nuestra comprensión del universo, porque proporciona la base para comprender por qué ocurre *cualquier* cambio» (Atkins 2008: 61). Su formulación vino a considerar que en ese proceso de cambios (primera ley) la energía pierde capacidad de trabajo en forma de calor, es decir, que parte de la energía se disipa y no puede ser reaprovechada para realizar un nuevo

---

6. En física se denomina «sistema» a cualquier parte del universo que constituye un objeto de estudio. Los sistemas tienen una frontera, que puede ser cerrada o abierta en función de la permeabilidad de materia y energía, y unas propiedades físicas (Atkins 2008: 15-16; Margalef 1980: 4-6).

7. La palabra procede del griego *ἐντροπία* y originariamente significaba transformación o evolución.

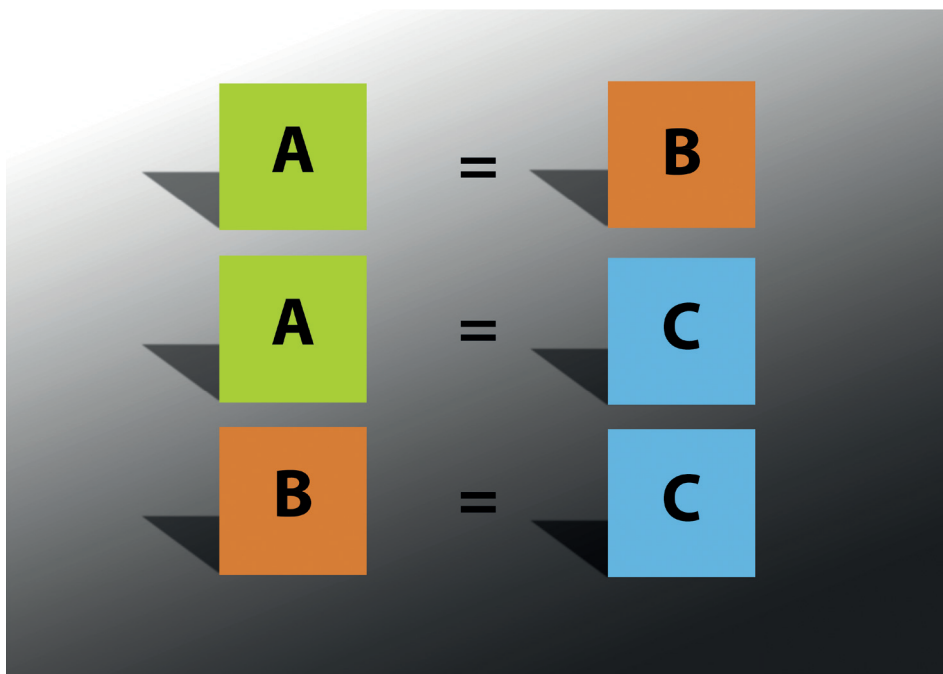


Figura 1. Esquematización del enunciado de la ley cero de la termodinámica.

trabajo (Schneider & Kay 1999: 224). Esa cantidad energética que deja de ser operativa, que se degrada, al dejar de ser útil, es lo que se denominó «entropía», magnitud representada mediante el símbolo  $S$  (Atkins 2008: 65-66; Ben-Naim 2011: 28-30; Gribbin 2006: 47-50; Schneider & Sagan 2009: 56 y 66) (fig. 2).

Por tanto, en cualquier proceso real de transferencia energética el incremento de entropía es siempre mayor a cero, con lo que la exergía<sup>8</sup> disminuye (Schneider & Kay 1999: 223-224). La entropía constituye una magnitud que mide el desorden, es decir, la degradación de la energía de un sistema. Algunos autores críticos con esta definición entienden que cuando en un sistema aumenta la entropía, este aparenta estar más ordenado. Arieh Ben-Naim (2011: 182-183) nos pone el ejemplo de un sistema cerrado con dos cámaras. Cada cámara contiene el mismo tipo de gas pero a distintas temperaturas. Cuando abrimos el compartimento que separa las partículas calientes de las frías, estas se mezclan, aumentando la entropía del sistema hasta alcanzarse el equilibrio térmico. Sin embargo, el estado final del sistema aparenta ser más homogéneo o uniforme que el estado inicial (fig. 3).

Ben-Naim (2011: 183, 202-203 y 207) llama la atención, muy acertadamente, sobre el carácter subjetivo que presentan conceptos como los de «orden» y «desorden». Sin

8. El término exergía suele utilizarse para designar a la energía libre o disponible que los sistemas incorporan para la realización de un trabajo. Dicho de otro modo, esta palabra hace referencia a la calidad de la energía o a la potencialidad de su uso (Schneider & Kay 1999: 223-224; Schneider & Sagan 2009: 45, 62 y 302).

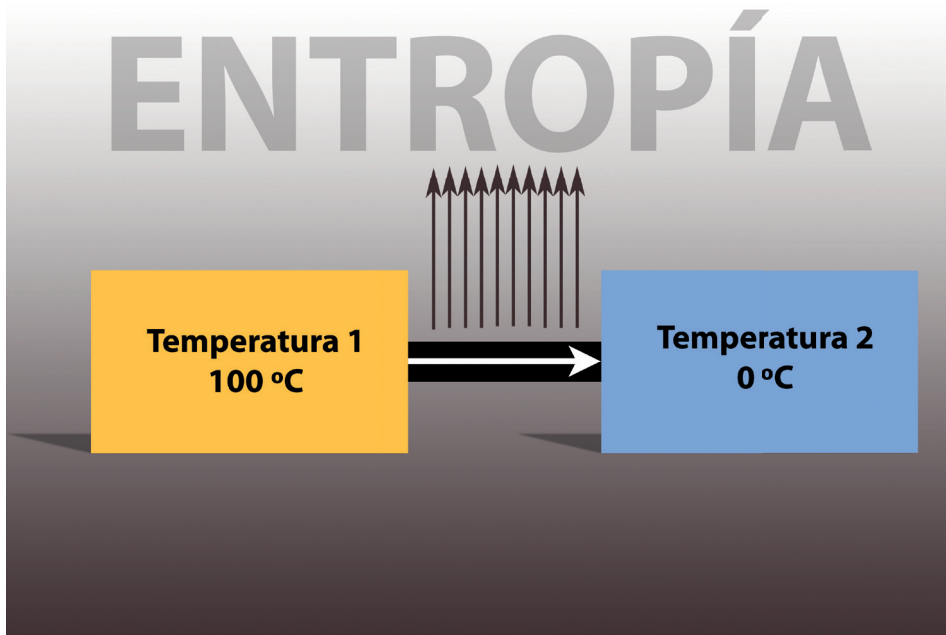


Figura 2. Esquematización del enunciado de la segunda ley de la termodinámica.

embargo, y a diferencia de este autor, creemos que son términos cuyos significados pueden dejar de ser laxos si los concretamos como tecnicismos, hecho que podría dotarlos de gran capacidad explicativa para el tema que aquí nos concierne. La subjetividad que estas palabras portan en sus acepciones vulgares reside en el hecho de entender el orden o el desorden desde una perspectiva de lo estético. En cambio, cuando expresemos tales términos para explicar características de sistemas termodinámicos lo haremos dentro de una definición exacta y técnica: dichas palabras se referirán a la capacidad de un sistema dado para realizar trabajo a partir de la energía disponible. Partiendo de esta definición, el estado inicial del sistema representado en la fig. 3 es más ordenado que el estado final puesto que, pese a aparentar estéticamente lo contrario, goza de un mayor potencial para realizar trabajo debido al gradiente térmico existente entre ambas cámaras.

Una de las ideas centrales de la concepción clásica de la termodinámica es lo que ha venido a denominarse como «la muerte térmica del universo» (Gribbin 2006: 50; Rubí 2009: 28-29; Schneider & Sagan 2009: 29). En tanto que la energía tiende a la entropía, es decir, al caos, al desorden, se pensaba que debido a esta tendencia toda la energía se degradaría en el vacío o frío cósmico, dejando a la larga de ser funcional al llegarse a un punto de máxima entropía o de equilibrio termodinámico. Debido a ello se llegó a creer que la vida se trataba de un fenómeno que contradecía a la segunda ley: mientras que los sistemas no vivos tendían al desorden atómico o molecular, los sistemas vivos tendían a organizarse, es decir, a incrementar su complejidad energética con el paso del tiempo (Gribbin 2006: 51; Jou Mirabent *et al.* 1995: 212; Rubí 2009: 29; Schneider & Sagan 2009: 32).



Figura 3. Estado inicial de un sistema compuesto por un gas distribuido en dos cámaras separadas y a diferentes temperaturas (arriba). Estado final del sistema tras eliminarse el compartimento y haberse alcanzado el equilibrio térmico (abajo).

Esta concepción –todavía presente en ciertos ámbitos académicos– ignoraba la interrelación existente entre los sistemas energéticos, pues se apoyaba en experimentos de laboratorio que solo tenían en cuenta sistemas energéticos aislados (Gribbin 2006: 163; Rubí 2009: 31-32; Schneider & Sagan 2009: 54-55). Tal hecho es lo que llevó a Erwin Schrödinger a romper con los planteamientos clásicos para otorgar a esta ley un ámbito de aplicación universal –y que abarcara también a los sistemas vivos– ya que lo normal en el universo es el predominio de los sistemas no aislados. Es más, autores como John Gribbin (2006: 55) nos recuerdan que «no existe nada que pueda considerarse un sistema cerrado (salvo la totalidad del universo), y [que] ningún sistema se encuentra en un equilibrio perfecto»; a lo que Ramón Margalef (1998: 895) añade: «Tampoco es cerrado el Universo. [...] La expansión del universo esquivada la amenaza de la muerte térmica y provee un gradiente de disipación de energía apropiado, al que se une nuestro sistema solar y la vida entera».

Si bien es cierto que la termodinámica clásica se configuró en el siglo XIX, fue en esta misma centuria y en la primera mitad de la siguiente cuando aparecieron algunas voces que tímidamente se alejaron de la ortodoxia, sembrando la fértil semilla de la renovación científica que terminaría germinando, sobre todo, a mediados del siglo XX. Un claro ejemplo de ello lo constituyó, Ludwig Büchner con su libro *Licht und Leben* (1882). Este autor, considerado uno de los grandes divulgadores de la ciencia del momento, reaccionó contra la instrumentalización religiosa de la segunda ley afirmando que la tendencia a la muerte térmica del universo no afectaba a la totalidad del mismo, sino que se

trataba de un hecho de carácter local, ya que en otras regiones del universo se formarían nuevos sistemas (Pohl & Cala 2010: 49).

Una importante aportación vino de la mano del austriaco Ludwig Boltzmann, uno de los pioneros en termodinámica probabilística o estadística. Sus ideas fueron esenciales para poder explicar matemáticamente cómo se configuran los microestados energéticos de los sistemas. Boltzmann planteó que las cosas cambiaban siempre en la dirección más probable (Jou Mirabent *et al.* 1995: 211), oponiéndose así su pensamiento al del matemático francés Henri Poincaré, quien entendía que dentro de una noción infinita de tiempo lo improbable tenía cabida, pudiéndose incluso repetir un número infinito de veces. Los postulados de Boltzmann resultaron ser tremendamente útiles, ya que él proponía que lo ideal, en términos probabilísticos, y lo real venían a converger. En este sentido, y siguiendo a este científico y no a Poincaré, Eric D. Schneider y Dorion Sagan (2009: 81) comentan que «no es imposible que todos los átomos de oxígeno de nuestro dormitorio se concentren en una esquina, dejándonos asfixiados; pero las posibilidades son tan escasas, la improbabilidad tan enorme, que no tenemos por qué preocuparnos».

En relación con esta misma idea, Boltzmann era consciente de la tremenda dificultad de calcular trayectorias individuales de millones de partículas, siendo más coherente y práctico examinar el comportamiento colectivo de los millones de comportamientos individuales. La termodinámica pasó así a procesar «la materia como un bosque, no como una suma de árboles» (Schneider & Sagan 2009: 86). Pensemos por ejemplo cómo se modifica la velocidad de cada partícula, de forma individual, de un litro de agua sometida a un proceso de congelación. Es imposible atender a la trayectoria concreta de cada una de ellas para registrar el cambio experimentado por el conjunto. Lo que se hace es considerar la velocidad media de todas, es decir, la temperatura (Ben-Naim 2011: 184-185).

Además de ello, este científico austriaco fue de los primeros en conectar, dentro de la ciencia moderna, la termodinámica con la biología. Planteó que el desarrollo de la vida es incomprensible sin tener en cuenta el gradiente existente entre el Sol y la Tierra<sup>9</sup>, siendo fundamental para los sistemas vivos incorporar energía dentro de una dinámica de competencia por la reducción de gradientes (Schneider & Sagan 2009: 92-93 y 185). Las aportaciones de Boltzmann resultaron una brisa de aire fresco para la termodinámica y sus ideas fueron complementadas por el norteamericano Josiah W. Gibbs, quien a partir del concepto de energía libre<sup>10</sup> de un sistema aplicó la termodinámica tanto a sistemas energéticos cerrados como abiertos. Gibbs concebía el equilibrio termodinámico como un estado en el que cesaba cualquier tipo de actividad debido a que el nivel de entropía era máximo y el de energía libre mínimo (Schneider & Sagan 2009: 103).

Vemos, por tanto, cómo las distintas ideas que se fueron cociendo dentro de la denominada termodinámica clásica terminan desembocando en una noción que funciona como denominador común: la muerte térmica del universo debido a un estado de máxima

---

9. Gribbin (2006: 177), entre otros, también comenta la idea relativa al aprovechamiento de la energía procedente del interior de la Tierra. Al desintegrarse elementos radioactivos en el núcleo terrestre se desprende energía de la que se alimentan formas de vida a través de grietas oceánicas. Estas formas de vida no dependen del gradiente solar para su existencia.

10. Se define como energía libre aquella que es convertible en trabajo (Schneider & Sagan 2009: 102-103).



entropía potenciado por la segunda ley. No obstante, Boltzmann llegó a sostener que, si bien era cierto que casi siempre la entropía aumenta, existían raras excepciones en las que esta podía disminuir. Dicho de otro modo, este físico austriaco entendía que no era imposible que la entropía disminuyese, sino improbable, hecho que le valió grandes críticas dentro del panorama científico de su época (Ben-Naim 2011: 32-35)<sup>11</sup>. Boltzmann abrió tímidamente la puerta para una nueva concepción de la termodinámica, sin embargo, al igual que Gibbs, no terminó rechazando la idea de la muerte térmica del universo, razón por la cual se le podría incluir dentro de una termodinámica clásica heterodoxa.

## LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO

Tal vez el enunciado de la tercera ley de la termodinámica en los años iniciales del siglo XX (1906-1912) sí pueda entenderse ya como una clara crítica o cuestionamiento del concepto de muerte térmica del universo. Dicho enunciado vino de la mano del físico-químico alemán Walther Nernst, quien postuló que, en la práctica, nada puede enfriarse hasta el cero absoluto o 0 K (Martínez Herranz 1992: 580). El cero absoluto se corresponde con la temperatura más baja que teóricamente se pudiera llegar a alcanzar ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), caracterizándose por la total ausencia de calor. A esta temperatura hipotética cesaría toda acción molecular y el gas se comprimiría hasta un volumen nulo (Atkins 2008: 119-120 y 125; Schneider & Sagan 2009: 73 y 127-128).

Este planteamiento viene dado desde la mecánica clásica. Empero, los partidarios de la mecánica cuántica esgrimen el principio de indeterminación de Heisenberg y entienden que si la temperatura de un cuerpo llegara al cero absoluto seguiría teniendo una energía residual, la llamada energía de punto cero. Si no es posible alcanzar estrictamente el 0 K, tal y como se defiende desde la mecánica clásica, e incluso si el 0 K implica la presencia de energía residual, tal y como se entiende desde la cuántica, es imposible que el universo alcance un grado de máxima entropía en el que toda acción o transferencia energética cese<sup>12</sup>.

Sin embargo, la llamada termodinámica de sistemas abiertos o del no equilibrio no comenzó a tomar carta de naturaleza hasta que en 1943 Erwin Schrödinger impartió en el Trinity College de Dublín un ciclo de conferencias titulado *What is life? The physical aspect of the living cell* (fig. 4).

De forma intuitiva y especulativa, pero dando en el centro de la diana, este físico de origen austriaco abordó dos cuestiones trascendentales para la biología del siglo XX: la naturaleza de la herencia y la termodinámica de los sistemas vivos. Si bien es cierto que muchos de los temas que expuso no partían de una tabla rasa, ya que se inspiró en los

---

11. Hoy se entiende que la producción total de entropía de un sistema energético es siempre positiva o igual cero, pero nunca negativa. No obstante, la formulación actual de la segunda ley «no prohíbe que algún término parcial sea negativo» (Tyrtania 2009: 80), aunque de ocurrir, sería una situación local, concreta y momentánea.

12. Entendemos que la definición ofrecida por los partidarios de la mecánica cuántica sobre el concepto de cero absoluto (0 K) no es incompatible con la de la mecánica clásica, sino que se trata de una redefinición del concepto asumiendo que es imposible experimentarlo, pues siempre habrá una energía residual. Con ello se anula igualmente la idea de equilibrio termodinámico. La definición que nos otorga la mecánica cuántica quizás esté más próxima a la idea de estado estacionario o próximo al equilibrio termodinámico (*vid. infra*).

trabajos de Max Delbrück y Ludwig Boltzmann entre otros, también lo es el hecho de que, gracias a estas conferencias, «popularizó y convenció a los físicos de la época de que ya era tiempo de considerar problemas biológicos» (Murphy & O'Neill 1999: 10). Schrödinger dibujó el borrador de un nuevo plano para un edificio que se encargaron de desarrollar y levantar posteriormente otros autores, tales como Ilya Prigogine en lo que a termodinámica se refiere. En la primera planta de esta edificación perfiló las trazas teóricas fundamentales para el posterior descubrimiento de la estructura del ADN y el gran desarrollo de la biología molecular (cf. Schrödinger 2008: 96-98). En la segunda planta puso en jaque mate a la concepción clásica de la termodinámica para asentar la base de lo que hoy en día se conoce como termodinámica del no equilibrio (TNE), aplicable tanto a sistemas no vivos como vivos (cf. Murphy & O'Neill 1999: 11-12; Schneider & Sagan 2009: 41; Schrödinger 2008: 113-115).

Existen críticas que cuestionan la importancia de esta obra para la ciencia actual. Un ejemplo de ello puede verse en la aportación de Stephen Jay Gould (1999) al congreso celebrado en el mismo Trinity College en 1993, acto conmemorativo del cincuenta aniversario del ciclo de conferencias de Schrödinger. Debemos expresar nuestra discrepancia respecto a la opinión del eminente paleontólogo, quien minusvaloró el trabajo del físico austriaco. Por una parte, creemos que a Gould, en su crítica, se le colaron valores de corte moral y político –los mismos principios ideológicos que le impidieron aceptar la explicación que Richard Dawkins y otros sociobiólogos hicieron del comportamiento altruista, incluido el del animal humano–. Recuérdese en este sentido su conocida participación en el movimiento de derechos civiles y su afinidad a las políticas de izquierdas, algo que en sí mismo no es malo, pero que probablemente impidió a este autor separar su pensamiento político de su análisis científico de la realidad para ciertos asuntos (cf. Margalef 1988: 17).

También pensamos que Gould se equivocó al vincular a Schrödinger con la filosofía de la Modernidad que, por ejemplo, caracteriza a la física clásica. Creemos que no quiso o no supo captar la profundidad de la idea del «orden a partir del desorden». Reflejo de dicha incomprensión se plasma al afirmar que Schrödinger apuntó hacia la posibilidad de una nueva ley física para la vida, cuando en realidad lo que proponía era reformular los enunciados de la termodinámica para que tuvieran cabida los sistemas energéticos abiertos –los vivos inclusive– (cf. Schrödinger 2008: 119 y 124-125).

Como decíamos, la paradoja entre la trayectoria entrópica del universo y la evolución biológica se basaba en la contradicción entre el enunciado clásico de la segunda ley de la termodinámica y la naturaleza de los sistemas energéticos vivos. Sobre esta cuestión reflexionaba Erwin Schrödinger (2008: 108): «La vida parece ser el comportamiento ordenado y reglamentado de la materia, que no está asentado exclusivamente en su tendencia de pasar del orden al desorden, sino basado en parte en un orden existente que es mantenido».

Según los postulados clásicos todo alcanza inevitablemente un estado de máxima entropía; sin embargo los sistemas vivos tienden a la organización, con lo que aparentemente se saltan la segunda ley (Schneider & Sagan 2009: 42-43; Schrödinger 2008: 110). La paradoja fue resuelta por Schrödinger en su célebre ciclo de conferencias del Trinity College de Dublín. Para ello reflexionó sobre la forma en que lo vivo se proyecta hacia el orden. Debe decirse, antes de nada, que la amplia mayoría de los sistemas energéticos

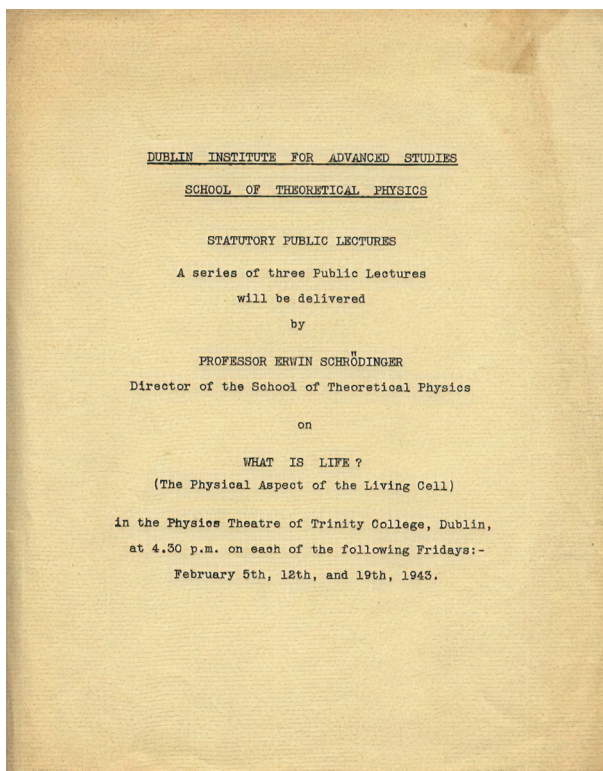


Figura 4. Cartel que publicita el ciclo de conferencias *What is life?* impartido por E. Schrödinger.

del universo no se encuentran aislados *per se*, y ello contribuye a que puedan mantenerse. Esta complejidad sistémica se explica por la interactiva interrelación entre lo existente. Lo normal es que un sistema se deshaga de forma irreversible de energía para volver a incorporar energía a través de sus límites (Kauffman 1999: 121 y 123; Schneider & Kay 1999: 222). En este sentido Erwin Schrödinger planteó:

¿Cómo evita la degradación el organismo vivo? La contestación obvia es: comiendo, bebiendo, respirando, fotosintetizando, etcétera. El término técnico que engloba todo eso es *metabolismo*. La palabra griega de la que deriva [...] significa cambio o intercambio. ¿Intercambio de qué? [...] ¿Qué es, entonces ese precioso algo contenido en nuestros alimentos y que nos defiende de la muerte? Esto es fácil de contestar. [...] todo lo que pasa en la Naturaleza, significa un aumento de la entropía de aquella parte del universo donde ocurre. Por lo tanto, un organismo vivo aumentará continuamente su entropía o, como también puede decirse, produce entropía positiva –y por ello tiende a aproximarse al peligroso estado de entropía máxima que es la muerte–. Solo puede mantenerse lejos de ella, es decir, vivo, extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente [...]. De lo que un organismo se alimenta es de entropía negativa. O, para expresarlo menos paradójicamente, el punto esencial del metabolismo es aquél en el que el organismo consigue librarse a sí mismo de toda la entropía que no puede dejar de producir mientras está vivo (Schrödinger 2008: 111-112).

Dicho de otra manera, y utilizando la terminología actualmente al uso<sup>13</sup>, se puede decir que en un momento dado un organismo vivo (B) puede ser fuente de energía para otro sistema biológico (C), y que la energía que el primero (B) incorpora viene a su vez dada de otro sistema (A), que a su vez puede captar directamente la energía de otras fuentes (p.ej. las ya citadas u otras). Con este ejemplo abstracto tratamos de referirnos a un proceso cualquiera de retroalimentación ecológica. Este, lejos de apuntar hacia una visión mecanicista sobre el mundo, constituye simplemente una descripción física de los «flujos» energéticos regidos por las leyes de la termodinámica. Además, para entender con mayor exactitud el proceso, debe tenerse en cuenta que los productores primarios de biomasa (vegetales, fitoplancton, algas pluricelulares, etc.) solo son capaces de aprovechar menos de 1% de la energía solar (Margalef 1988: 31). Cuando los productores primarios sirven de alimento a productores secundarios (p.ej. herbívoros), estos a su vez solo son capaces de aprovechar un 10% aprox. de la energía de los primeros en su metabolismo endosomático, y así sucesivamente conforme se escala en la pirámide de relaciones tróficas (Margalef 1988: 22; Shawcross 1972: 581).

Los seres vivos, incluido el animal humano, deben entenderse por tanto dentro de esta dinámica. Somos sistemas termodinámicos abiertos o en constante desequilibrio energético, en cuanto a que la segunda ley nos proyecta de forma imperativa un *output* energético (entropía) que nos obliga –para esquivar un estado de máxima entropía– a tener una constante entrada o *input* de energía que captamos del ecosistema del que formamos parte a través de nuestro nicho ecológico. Por tanto, estas directrices marcadas por esta ley son nuestra principal y más básica función, sin ellas no podemos comprender ningún sistema vivo (Margulis & Sagan 2003: 77; Schneider & Sagan 2009: 19-20, 69 y 158; Schrödinger 2008: 114-115). En este sentido, y volvemos a traer a colación la idea de Lotka, la vida es un proceso de constante desequilibrio energético. Un individuo vivo es como una cerilla que está quemándose y que para seguir ardiendo necesita constantemente un aporte energético que obtiene de otros sistemas energéticos con los que se interrelaciona (fig. 5).

La apariencia de estabilidad sistémica es en sí misma un error perceptivo. Desde el punto de vista energético los seres vivos no tienden al equilibrio, hecho que supondría la muerte del sistema (Gribbin 2006: 164; Jou Mirabent *et al.* 1995: 212), pues la constante disipación de gradientes energéticos es prueba evidente de lo contrario<sup>14</sup>. Lo que sí se produce, y es aquí donde radica tal error de perceptibilidad, es lo que el noruego Lars Onsager definió como metaestabilidad. Tal concepto hace referencia a aquellos sistemas que se encuentran a cierta distancia del equilibrio (Schneider & Sagan 2009: 124-125). El mismo Lotka llegó a comentar sobre este asunto «que los sistemas cercanos al equilibrio parecen estáticos, pero que en realidad se encuentran en un estado estacionario, “comiéndose” un gradiente» (Schneider & Sagan 2009: 115).

---

13. En el actual campo de la termodinámica el término «entropía negativa» o «neguentropía» ha sido desechado. Tampoco suele hablarse de «entropía positiva», sino de «energía» y «entropía».

14. Unas líneas más abajo se volverá sobre la idea de qué es un gradiente a partir de un ejemplo. Entiéndase, a modo de síntesis aclaratoria, que es una diferencia energética resultado de la energía que se pierde por imperativo de la segunda ley. Ese desequilibrio se ve compensado por la nueva entrada de energía en el sistema que hace que se contrarreste el gradiente. Dicho proceso se reitera en los sistemas energéticos de forma cíclica.



Figura 5. Una cerilla quemándose como metáfora de la vida.

Debemos diferenciar el concepto de equilibrio termodinámico de la noción de estado estacionario de un sistema. Mientras que el primero describe una situación en la que todas las variables que definen el sistema no cambian a lo largo del tiempo, el segundo describe un sistema, cercano al equilibrio, en el que para mantener la constancia de sus variables requiere de un constante «flujo» de materia y energía que inyecta a partir de su relación con otros sistemas con los que interactúa, con lo que la producción de entropía es mínima. Esto último se conoce como el principio Prigogine-Waime (Tyrtania 2009: 80). Esta idea nos lleva a poner sobre la mesa la denominada «hipótesis del equilibrio local», la cual plantea que un sistema metaestable o en estado estacionario solo es posible localmente, ya que para lograr reducir la tasa de producción de entropía debe aumentar la entropía fuera de sus fronteras (Tyrtania 2009: 99).

Al igual que hizo Schrödinger, también los estudios de Harold J. Morowitz han tratado de conectar lo vivo con lo no vivo, hasta el punto de considerarse sus enunciados como firmes candidatos para conformar un posible cuarto principio de la termodinámica (Schneider & Sagan 2009: 132). Morowitz postuló que los sistemas en estado estacionario aumentan su complejidad con el paso del tiempo al estar conectados a un ciclo energético, es decir, que se encuentran inmersos dentro de una red de relaciones con otros sistemas con los que interactúan. En el proceso de complejización de tales ciclos energéticos se

acumulan estados pasados del sistema en una especie de «memoria natural», y que por tanto puede rastrearse el proceso experimentado. Esto mismo ha podido verificarse en los estudios sobre células, las cuales contienen reminiscencias bioquímicas de ciclos termodinámicos y de ancestros desde los que evolucionaron (Schneider & Sagan 2009: 132-133).

Ahora bien, ¿qué es lo que impulsa a los sistemas a intercambiar energía? La tendencia de lo existente se ve inducida por la segunda ley a la reducción o disipación de gradientes energéticos. Dicha expresión –gradiente energético– hace alusión a la diferencia energética entre dos o más sistemas. La tendencia a aborrecer los gradientes implica que para contrarrestar esa diferencia los sistemas están constantemente haciendo que la energía «fluya» de unos a otros. Eric D. Schneider y Dorion Sagan (2009: 31) nos ponen un excelente ejemplo que clarifica la idea esbozada:

Un caso de supresión de gradientes con el que estamos familiarizados, y que se relaciona con la aversión de la naturaleza por el vacío, es la compresión de una lata de metal de la que se haya extraído el aire. En este ejemplo, la naturaleza rectifica la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la lata, sobre la que el aire circundante ejerce una presión de casi un kilo por centímetro cuadrado (Schneider & Sagan 2009: 31).

En el caso de no disponerse de instrumental adecuado para llevar a cabo el ejemplo con el que dichos autores ilustran la noción de gradiente, como por ejemplo una bomba de vacío, puede efectuarse un experimento casero bastante sencillo. Llenemos una lata vacía de un refresco cualquiera con algunas gotas de agua del grifo. Cinco o seis de ellas bastarán. A continuación tomemos otro recipiente, por ejemplo una cazuela, y llenémoslo con agua fría, pudiéndosele añadir incluso algunos cubos de hielo. A continuación sujetemos la lata con una pinza, como las empleadas en las barbacoas para tomar piezas de carne, y pongamos su base sobre el fuego de una hornilla. Al poco tiempo comenzaremos a escuchar un pequeño silbido que se debe a la evaporación de las gotas de agua. Espere-mos todavía unos segundos antes de voltear la lata e introducirla en la cazuela con agua fría por la parte de su orificio para ver cómo de repente se comprime.

¿Por qué ocurre esto? Por la aversión de la naturaleza hacia los gradientes. En este ejemplo hemos originado una diferencia de presión entre el interior de la lata y su exterior al propiciar el vacío. Cuando calentamos el recipiente hacemos que las partículas de agua ocupen todo el espacio de la lata a modo de vapor de agua. Dicho gas se enfría rápidamente cuando introducimos la lata en la cazuela, originándose una depresión en su interior al no ocupar ahora tales partículas todo el espacio. Así, el aire de la atmósfera ejerce presión sobre el recipiente, rectificándose la diferencia, o gradiente de presión, al arrugarse la lata, e incluso absorbiendo agua fría contenida en la cazuela.

En resumidas cuentas, y aunque parezca contradictorio, es la tendencia a la entropía la que origina gradientes y la que, al forzar a la reducción de los mismos, asegura la organización: el «orden a partir del desorden» o el también llamado «desorden productivo» (Margalef 1998: 894; Prigogine 1997: 36; Schneider & Kay 1999: 226-227; Schneider & Sagan 2009: 47; Schrödinger 2008: 123-124; Tyrtania 2009: 81-82 y 92-93). Sin embargo, debemos quitar de nuestra cabeza la idea de un orden perpetuo y asumir la noción de una organización cambiante, no estable, debido a la constante «fluidez» de energía que se transforma –como dicta el enunciado de la primera ley–. Es de esta forma



Figura 6. Un par de mitocondrias celulares del tejido pulmonar de un mamífero.

cómo los sistemas esquivan el estado de equilibrio energético postulado por la termodinámica clásica. Pero ¿qué tiene que ver todo esto con los seres vivos? Como comentan Schneider y Sagan:

los gradientes también impulsan a los organismos. Pero estos, máquinas naturales que, en lugar de fabricarse, se desarrollan, nunca extraen su energía de gradientes de temperatura, como sí hacen los motores térmicos. Clasificados como máquinas, los organismos deberían considerarse robots autorreplicantes nanotecnológicos, inteligentes y a menudo conscientes, que obtienen su energía de gradientes químicos. Los organismos fotosintéticos, como plantas, algas y bacterias fotosintéticas, son aún más sofisticados: obtienen su energía directamente del Sol, es decir, del gradiente solar (Schneider & Sagan 2009: 69).

En este mismo sentido, Margalef (1980: 3) añade que los seres vivos solo pueden aprovechar dos tipos de energía, la electromagnética de longitud de onda relativamente corta o bien la energía química. ¿Cómo un ser vivo obtiene energía de un gradiente? Esto se produce a través de las mitocondrias celulares, piezas fundamentales para comprender el metabolismo endosomático. Al ser nuestro objeto de estudio el animal humano, pongamos el ejemplo de una célula animal cualquiera (fig. 6).

En dicha mitocondria se genera energía eléctrica cuando las moléculas de hidrógeno que se incorporan en el organismo a través de la alimentación reaccionan con las

moléculas de oxígeno que se incorporan a través de la respiración. Este tipo de reacción se denomina redox –o de reducción-oxidación–, y viene motivada por la eliminación de un gradiente químico (Schneider & Sagan 2009: 74-75 y 328): el hidrógeno y el oxígeno tienen un número atómico distinto, al poseer el primero un electrón y el segundo ocho. Cuando el átomo de hidrógeno entra en contacto con el de oxígeno, este cede electrones mientras que el otro, al tener menos, los acepta. El agente reductor –el oxígeno– se oxida al ceder electrones y el agente oxidante –el hidrógeno– se reduce al disminuir su capacidad oxidante. La eliminación del gradiente químico genera un potencial energético que es transferido a través de las membranas mitocondriales a una molécula que almacena la energía, el ATP –o trifosfato de adenosina–, que al descomponerse libera la energía que el organismo consume en sus distintas funciones y actividades.

Vemos aquí, por tanto, una clara y evidente conexión entre la termodinámica y la biología. Hasta tal punto la comprensión sobre la estructura de las células y su funcionamiento es relevante para la definición de la vida que Lynn Margulis y Dorion Sagan no han dudado en afirmar que:

La vida desarrolló la identidad de la célula. La materia viva en forma de células y organismos constituidos por ellas comenzó a reducir los gradientes químicos y energéticos de un planeta aún adolescente y turbulento. De hecho, la tendencia a organizarse localmente «para» liberarse de las anomalías estadísticas encarnadas por los gradientes es profunda y determina la organización de la vida a todas las escalas (Margulis & Sagan 2003: 79-80).

Ahora bien, ¿qué supone la muerte de un ser vivo en clave termodinámica? Antes de contestar a esta pregunta vamos a comentar un caso que quizás han podido experimentar aquellas personas que viven o que han estado durante un tiempo en lugares donde los veranos son muy calurosos. Estas personas, sin ser conscientes de ello, se han podido hallar ante curiosas actitudes conductuales regidas por la segunda ley de la termodinámica. Pongamos un ejemplo. En aquellas casas o residencias donde no se cuenta con elementos tecnológicos como aires acondicionados, los habitantes suelen despertarse con cierta angustia durante las noches de gran calor en las que el aire no circula por la estancia, aun teniendo las puertas y ventanas abiertas de par en par. Suele ser frecuente que se acuda al exterior en búsqueda de aire fresco o bien que se vaya corriendo al refrigerador para beber agua fría o algún sucedáneo.

¿Qué ha ocurrido? Se ha desarrollado un comportamiento destinado a la creación de un gradiente para que luego sea eliminado. La energía tiende a disiparse siguiendo una dirección durante la transferencia: de aquello donde está más «concentrada» a aquello otro donde lo está menos. Cuando el calor del entorno es tal que nuestro organismo no puede disipar en él el calor que desprende con cierta «fluidez», se requiere de alguna estrategia (consciente o inconsciente, esto es lo de menos) destinada a crear un gradiente, en este caso una diferencia térmica. El líquido frío que ingerimos o la búsqueda de un entorno algo más fresco hacen que nuestro calor «fluya» hacia él. Si estos tipos de comportamientos no llegaran a ejecutarse por las circunstancias que fueren, se correría el riesgo de que nuestro sistema biológico entrara en crisis, pudiendo ello suponer incluso la muerte.



Acudiremos una vez más a Schneider y Sagan para afrontar la cuestión planteada sobre la muerte. Estos autores comentan que

la capacidad de la vida de canalizar la energía puede verse comprometida por la enfermedad y la disfunción, y ser destruida por la muerte. No obstante, la materia viva ha encontrado una manera de burlar la inevitable degradación entrópica de sus sistemas: la reproducción. Mediante la reproducción se producen nuevos cuerpos, nuevas máquinas metabólicas naturales, que continúan el trabajo disipativo de sus progenitores (Schneider & Sagan 2009: 120-121).

A diferencia de lo inorgánico, una de las características de la materia orgánica es su capacidad para replicarse. Como se ha dicho, los seres vivos son sistemas energéticos que esquivan el equilibrio termodinámico –que implicaría la muerte– incorporando constantemente energía de cara a la reducción de los gradientes que la segunda ley impone. Sin embargo, esto no nos diferencia demasiado de otros sistemas termodinámicos complejos, como pueden ser las denominadas «células de Bénard», los tornados o los remolinos. Llega un momento en tal proceso en el que el ser vivo, como sistema, alcanza un estado de máxima entropía al haberse visto interrumpidas sus funciones vitales por algún factor de degeneración, como por ejemplo la enfermedad, una agresión violenta o algún tipo de fallo debido a la vejez.

No obstante, el sistema energético biofísico tiene la posibilidad de generar replicantes, dando así paso a nuevas «máquinas metabólicas» que sigan disipando gradientes energéticos. En este punto podemos conectar la TNE con el modelo explicativo de la evolución planteado por Charles Darwin, hoy día reforzado por los numerosos aportes de especialistas, y que desarrollaremos con mayor profundidad en el segundo bloque del libro. Durante la replicación biológica se experimentan cambios. Tales diferencias se ven sometidas a procesos de presión y de retención selectiva en función de sus capacidades para volver a replicarse, y así seguir dejando descendencia que siga inmersa dentro de un ciclo de reducción de gradientes energéticos (Margalef 1998: 898). Sin embargo –y aquí radica la importancia de entender la vida bajo la noción de sistemas termodinámicos abiertos– cuando un ser vivo fallece, es decir deja de canalizar energía, este se recicla y pasa a «nutrir» a otros organismos (Margalef 1998: 895 y 898; Schneider & Sagan 2009: 122; Schrödinger 2008: 114-115).

Centrándonos en el objeto de estudio de las ciencias históricas surgen un par de cuestiones que resultan fundamentales, sobre todo a la hora de comprender la relevancia de la termodinámica en el marco de una arqueología entendida como biología:

¿Siempre se producen disipaciones de gradientes energéticos en las poblaciones humanas? Toda población humana está constantemente disipando gradientes de energía, en cuanto a que se compone de individuos que así lo hacen por razones metabólicas de carácter endosomático. El metabolismo endosomático es aquel que tiene lugar en las células, como arriba explicamos. Se trata de un conjunto de reacciones y de procesos bioquímicos que se da a nivel celular y que permite al individuo mantener activos tanto su estructura orgánica como sus funciones vitales básicas o elementales (Ramos 2012: 72).

Pero además, para comprender tanto al animal humano como a otras tantas especies de seres vivos se hace necesario remarcar que también existe un metabolismo

exosomático. Este otro concepto hace referencia a la necesidad que un individuo o grupo tiene de incorporar energía y materiales para mantener conductas o aspectos culturales, por lo que es igualmente fundamental para la existencia de la sociedad (Ramos 2012: 72). Esta energía y conjunto de materiales son captados en el ecosistema mediante el nicho ecológico ocupado y son manejados por las comunidades a nivel extrasomático, implicando transformaciones tanto de la propia sociedad como del resto de componentes del ecosistema del que esta es parte. Como bien comenta Ramón Margalef, para el caso del animal humano la energía que se moviliza a nivel exosomático es tremendamente superior a la requerida a nivel endosomático:

Nuestras necesidades de alimento corresponden a un metabolismo o energía endosomáticos, que es de unos 120 vatios [por individuo]; pero somos capaces de movilizar mucha más energía en iluminación, calefacción, transporte, etc., energía que se puede considerar como un metabolismo exosomático (Margalef 1988: 30-31).

Un ejemplo de metabolismo exosomático sería una fogata alimentada con madera, y que sirve para caldear una casa en invierno o para cocinar. De hecho, la casa, con todos los elementos muebles e inmuebles que la componen, sería también parte del metabolismo exosomático de ese grupo. En cambio, los alimentos que los habitantes de dicha casa consumen para poder subsistir se vinculan a su metabolismo endosomático. La energía incorporada a nivel endosomático es consumida por el organismo. Pero también el «flujo» de energía y de materiales que alimentan el metabolismo exosomático de un grupo requiere constantemente de un *input*, ya que se tratan de elementos que tienen igualmente una vida útil, un *output*, y necesitan ser restituidos en el tiempo –p. ej. más combustible para la fogata–, pero también complementados o sustituidos por otros, como ocurre cuando se implementa una nueva tecnología –p. ej. la anafe y la estufa de gas–.

En definitiva, las comunidades humanas están permanentemente disipando gradientes energéticos, tanto a nivel endosomático como exosomático. Desde la arqueología podemos aproximarnos a ambos tipos de metabolismo con sendas tasas de disipación. Para el endosomático resulta esencial prestar atención a los restos de alimentos del registro arqueológico. Su cuantificación y caracterización arqueozoológica y/o arqueobotánica permiten definir los aportes calóricos que estos alimentos representaron para los comensales. Otros elementos del registro arqueológico, pero también la documentación escrita, la etnografía comparada y la arqueología experimental, nos pueden ayudar a estimar en qué actividades se invertían luego tales calorías y en qué medida. Trabajos que hoy en día siguen siendo ejemplares para este tipo de aproximaciones son los de Wilfred Shawcross (1968 y 1972), quien estudió diferentes concheros prehistóricos de Nueva Zelanda en clave energética; pero también contamos con estudios antropológicos para diferentes tipos de sociedades como los esquimales de la isla de Baffin, en Canadá (Kemp 1975), los tsembaga de Nueva Guinea (Rappaport 1975), los karimojong de Uganda (Dyson-Hudson & Dyson-Hudson 1975) o las modernas sociedades industriales (Cook 1975).

Para el caso del metabolismo exosomático contamos con un análisis que hicimos sobre el sistema poblacional que había en el entorno del Bajo Guadalquivir (en el SO de España) entre los siglos II/III y VI d.C., tomando como unidades de análisis los

yacimientos arqueológicos en sí mismos. En esta misma investigación analizamos la evolución del metabolismo exosomático y de la tasa de disipación de gradientes energéticos que a nivel interno presentaba la comunidad que vivió en la villa romana de La Vereda, en Burguillos (Sevilla, España), tomando como unidad de análisis el repertorio de ánforas y de vajilla fina de mesa (cf. Pérez-Aguilar 2018b: 1143-1163 y 1182-1231).

Por otra parte cabe preguntarnos, ¿existe una relación entre el balance energético<sup>15</sup> y la tasa de reproducción de las poblaciones? Todo proceso de reproducción de una población –ya sea esta  $K$  o  $r$ , conceptos que se verán un poco más adelante– tiene un coste energético, tanto a nivel endosomático como exosomático. Dicho de otro modo, reproducirse, como cualquier otro proceso vital, implica necesariamente una inversión de energía. A nuestro parecer, lo interesante es examinar la variabilidad reproductiva en función del coste energético que cada una de las variantes presenta. No todas las estructuras requieren invertir la misma cantidad de energía para reproducirse. Hay casos más costosos que otros. Y ello debe proyectarse bien en el nicho que cada entidad ocupa o bien debe otorgar éxito reproductivo diferencial.

Pero volviendo a la cuestión, ¿existe relación entre balanza energética y reproducción? Necesariamente debe de existir, porque una entidad que presente permanentemente una balanza energética negativa no podrá reproducirse en cuanto a que está encaminada al colapso, a desaparecer o morir. En cambio, como comenta Margalef (1988: 34-35), un balance energético positivo es un claro reflejo de que el número de unidades disipativas se ha incrementado –lo cual implica la reproducción de las mismas–, pero también puede significar que el uso de energía exosomática *per capita* es mayor.

A partir de estas ideas la casuística puede ser diversa, pero siempre debe explorarse sobre una base empírica. Pongamos un ejemplo que gira en torno al metabolismo exosomático de una serie de asentamientos del suroeste de la península ibérica. La industria salazonera gaditana, en España, remonta sus orígenes como mínimo a las últimas centurias de la Protohistoria (Muñoz & Frutos 2009). En el periodo romano republicano (siglos II-I a. C.) seguía funcionando un número considerable de factorías de salazones y de talleres alfareros donde se fabricaban ánforas para la comercialización de estas mercancías. La existencia de este tipo de núcleos no puede dissociarse de la demanda económica de tales productos, la cual propició una balanza energética positiva que permitió tanto la mantención de los enclaves existentes como la proliferación de otros tantos en época altoimperial romana.

Pues bien, entre la segunda mitad del siglo II y el siglo III d. C. muchos de estos núcleos productivos se abandonaron, ya que las políticas estatales debilitaron la capacidad de negocio de sus propietarios (García Vargas & Bernal 2009: 177-178), siendo las salazones y las salsas de pescado gaditanos desplazados en el mercado por productos de otras zonas del imperio romano (Reynolds 2007: 24). Tales políticas, en definitiva, lo que hicieron es generar un balance energético negativo que impidió tanto el mantenimiento como la reproducción de buena parte de estos complejos productivos (Pérez-Aguilar 2017: 141). Tanto es así que en época tardorromana (siglos III-V d. C.) el poblamiento humano se concentraría especialmente en las desembocaduras de los

---

15. La balanza o balance energético es la diferencia entre el *input* y el *output* de energía de un sistema. Puede ser positivo, negativo o neutro.

ríos Guadalquivir y Guadalete, quizás por las ventajas agropecuarias que ofrecían estas otras zonas (cf. Fornell 1999: 608; Lagóstena *et al.* 1996: 98-99; Rodríguez Mellado 2017: 468-485) y, en el caso de la desembocadura del Guadalquivir, por su mayor cercanía al litoral onubense-lusitano, cuya industria pesquera estaba ahora en auge (Pérez-Aguilar 2018b: 1274 y 1277).

## TERMODINÁMICA, CICLOS Y REDES ECOLÓGICAS

Un sistema o red se conforma de una serie de elementos que lo componen. Por una parte se encuentran los nodos o subsistemas, entidades donde se realizan las conexiones. Por otra parte están los enlaces o conexiones propiamente dichos, pues a través de ellos se interrelacionan los nodos de la red (Gribbin 2006: 251). El elenco de posibilidades a partir del cual los distintos elementos de una red interaccionan entre ellos es lo que se ha denominado topología de la red. En su análisis es relevante considerar tanto la estadística de conexiones como la presencia/ausencia de nodos-conexiones relevantes o fundamentales en la estructura de la red (*hubs*).

Esta forma de abstraer la realidad ha sido frecuentemente usada en ecología, siendo igualmente útil para los ámbitos de la antropología y de la arqueología. Una red podría perfectamente representar a un sistema o conjunto de asentamientos interrelacionados funcionalmente entre sí. Piénsese, por ejemplo, en las formas que tienen de estructurarse y de ocuparse los territorios a nivel político-administrativo y económico en época romana o durante el periodo medieval. Pero los análisis de redes también pueden servir para explicar el funcionamiento interno de cada una de dichas entidades poblacionales, compuestas a su vez por subunidades o grupos de subunidades que interactúan entre sí a diferentes escalas. Pongamos el caso de una ciudad, subdividida urbanísticamente en diferentes sectores funcionales, todos ellos necesarios para comprender la evolución del asentamiento en su conjunto.

Las dinámicas y ciclos de las redes comenzaron a trabajarse de la mano de Alfred J. Lotka a comienzos del siglo XX. Este investigador indagó sobre los mecanismos de autopropagación de sistemas cíclicos en los que pueden llegar a conectarse —a modo de red— sistemas físicos, químicos, biológicos, sociales y tecnológicos. El proceso mediante el cual se forma una de estas redes fue denominado por Lotka como autocatálisis. Este científico llegó a trabajar sobre estos temas cuando en su laboratorio observó que existían reacciones químicas que eran a su vez reactantes de otras, puesto que A producía B, B producía C, ... hasta llegar nuevamente a A. Ello le llevó a plantear una serie de ecuaciones para explicar este fenómeno cíclico, pudiendo aplicar las mismas al estudio de poblaciones (Gribbin 2006: 184-185, 189 y 256; Schneider & Sagan 2009: 131-132).

Una red autocatalítica importa y exporta materia y energía. Cuando importa más de lo que exporta la red crece, denominándose red autocatalítica positiva (Schneider & Sagan 2009: 134 y 154). Las redes —que integran de forma cooperativa diversos nodos— compiten entre sí por la materia y la energía, viéndose sometidas a un proceso selectivo en el que tienden a beneficiarse aquellas con una mayor capacidad de intensificar la autocatálisis del sistema (Schneider & Sagan 2009: 136). Robert Ulanowicz entendía los ecosistemas desde esta perspectiva de redes, asumiendo que la segunda ley incrementaba la

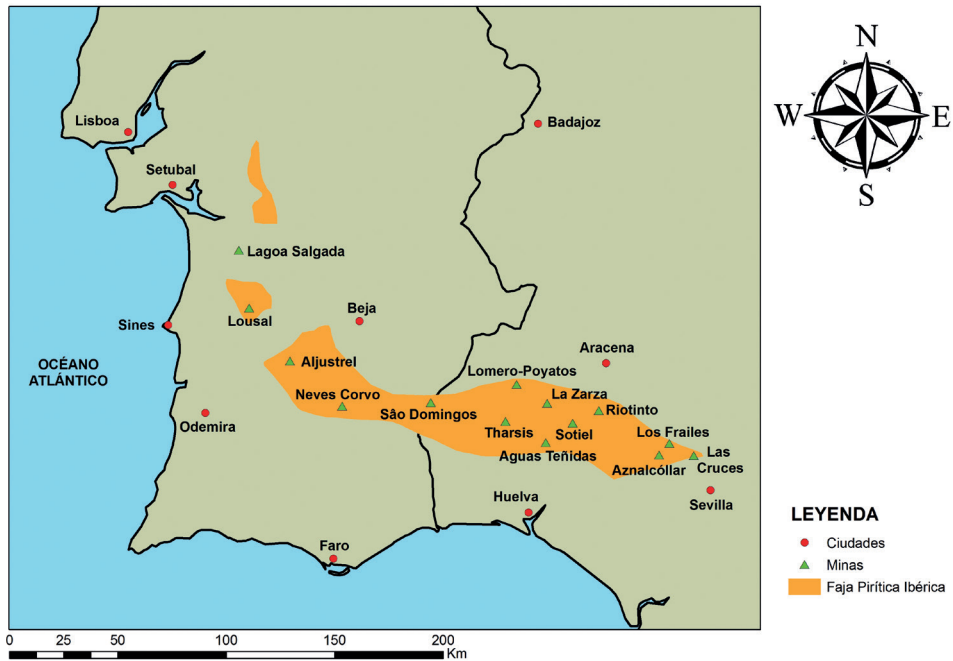


Figura 7. Situación de la Faja Pirítica Ibérica y de las principales minas romanas en el SO de la península ibérica.

complejidad de los sistemas ecosistémicos. Además, este científico distinguió dos formas a través de las cuales entra la materia y la energía dentro del sistema o red (Schneider & Sagan 2009: 138): A) Atravesándolo en línea recta; y B) Describiendo, a su vez, uno o varios ciclos dentro del sistema al pasar a través de los distintos nodos –o subsistemas– que conforman la red.

Uno de los fenómenos a destacar dentro de la evolución de una red autocatalítica positiva es aquel mediante el cual esta crece enteramente gracias a la intensificación de una de sus partes, potenciando por tanto la capacidad disipativa del sistema (Schneider & Kay 1999: 227). Por poner un ejemplo histórico-arqueológico, las investigaciones que vienen haciéndose sobre el poblamiento altoimperial romano en *Hispania*, han destacado cómo la importante vitalidad de la actividad minera –especialmente de metales amoneda- bles como la plata y el cobre– en la llamada «Faja Pirítica Ibérica» dinamizó buena parte del SO de la península ibérica.

La Faja Pirítica Ibérica es un distrito minero de unos 250 km de largo por 30 km de ancho (fig. 7) donde hubo entre 80 y 100 minas (Neves Corvo, Aljustrel, Tharsis, Riotinto, Aznalcóllar-Los Frailes, Las Cruces, etc.). La tasa de explotación minera fue tan grande que no volvería a lograrse algo semejante hasta el siglo XIX, exportándose los lingotes desde los poblados mineros a través de los ríos Guadiana, Tinto-Odiel y Guadiamar-Guadalquivir. Estos asentamientos mineros tenían que ser abastecidos de diferentes tipos de bastimentos, lo que generó la eclosión de asentamientos agropecuarios

en zonas más aptas para la agricultura, como la Tierra Llana de Huelva, los Llanos de Aroche, el Campo de Tejada, el centro-sur del valle del Guadamar o parte del Aljarafe sevillano, pero también de factorías de salazones y de salsas de pescado en el litoral bético-lusitano más inmediato e incluso de enclaves fortificados o *castella* para proteger las diferentes rutas comerciales (cf. Garrido 2011; Pérez Macías 2014; Vidal & Campos 2008). Vemos, por tanto, cómo el crecimiento de una serie de nodos de esta red que ocupa un nicho ecológico concreto —el de la minería—, estimuló el crecimiento de la red en su conjunto.

Sin embargo, y para evitar confusiones que desemboquen en percepciones simplistas y mecanicistas de la realidad, el crecimiento de una red autocatalítica no es eterno, sino que puede derivar en procesos de retroacción negativa que inviertan la tendencia del sistema debido a agentes limitantes. Schneider y Sagan (2009: 140) nos ponen como ejemplos de estos agentes el espacio, el alimento e incluso la gravedad para los sistemas biológicos. Pero esta lista podría ampliarse mucho más. En lo que a ecología humana se refiere, podríamos considerar factores tales como temporales y cambios climáticos, enfermedades, crisis económicas, limitaciones técnicas y tecnológicas, etc. En términos generales se puede decir que tales topes responden a la siguiente lógica: como se ha dicho, una red crece cuando el *input* energético supera al *output* que impone la segunda ley. Sin embargo, este crecimiento sistémico genera a su vez un incremento de la entropía, con lo que para poder mantenerse la red tendrá que seguir captando del entorno una cantidad de energía que le permita contrarrestar un posible déficit (Tyrtania 2009: 76). En el momento en el que esto no es posible, en razón de agentes limitantes como los anotados u otros tantos, la red termina extinguiéndose para dejar el espacio ecológico que ocupa a otra red. Una posibilidad distinta ante tal tesitura es que el sistema se contraiga, reajuste su estrategia o que se desmiembre en entidades que permitan seguir disipando gradientes energéticos de forma eficiente.

Siguiendo con el anterior ejemplo, a comienzos del siglo II d. C. la actividad minera del SO hispano entró en recesión. Las arcas del Estado romano habían quedado esquiladas a finales del siglo I debido a las costosas guerras de los emperadores Tito y Domiciano (Albertini 2005: 88). La situación pudo sobrellevarse gracias a la conquista de la Dacia y de sus minas de oro. Pero avanzado el tiempo la fallida conquista de Mesopotamia por parte de Trajano sumaría nuevas dificultades al erario. Ya en época del emperador Marco Aurelio los problemas se acrecentaron al abrirse varios frentes no ya ofensivos, sino defensivos (Albertini 2005: 102-103). Todo esto, junto a la imposibilidad de subir impuestos (Chic 2005: 583), hizo que el Estado romano no pudiera invertir los grandes capitales que las minas requerían en infraestructuras (García Vargas 2012: 235), con lo que muchas minas y poblados mineros se abandonaron entre finales del siglo II y el siglo III d. C. (Pérez Macías 2014: 135 y 137).

Entre los siglos III y IV d. C. posiblemente se produjo un trasvase poblacional desde las minas hacia la costa debido a la bonanza de las factorías de pescado onubense-lusitanas, que debieron aprovechar el vacío que en el mercado había dejado la industria gaditana (Vidal & Campos 2008: 273-274). El hundimiento de la minería también hizo que muchos asentamientos volcados a la explotación agropecuaria y al suministro de la comarca minera se abandonasen. Algunos núcleos se mantuvieron activos en épocas tardorromana y tardoantigua —p. ej. Los Jimenos, Alto de la Piedra, Los Bojeos, etc.—, siendo posible que ahora estos reorientaran la salida de sus productos hacia la pujante zona costera

(Vidal & Campos 2008: 283). Vemos de este modo cómo un agente limitante de naturaleza económica –la financiación de la minería– hizo decrecer a la red en cuanto al número de nodos activos, pero también obligó a reestructurar su estrategia disipativa y ocupacional (Pérez-Aguilar 2017: 142).

Los agentes limitantes no deben concebirse solamente como variables externas o periféricas. Un fenómeno que limita el crecimiento autocatalítico fue el planteado a mediados del siglo XX por el matemático Alan Turing, quien observó que en determinados procesos de catálisis una sustancia, por ejemplo A, no solo terminaba produciendo más A, sino que podía llegar a generar un compuesto inhibidor B que frenara la velocidad del proceso autocatalítico (Gribbin 2006: 185). En relación con esta última idea, Leonardo Tyrantia (2009: 83) nos comenta que mientras más se aleja un sistema energético del estado de equilibrio más aumenta su complejidad. Sin embargo, esto entraña importantes riesgos, ya que dicho incremento va parejo a un aumento de la fragilidad sistémica. La razón de ello es simple: el gran distanciamiento solo es posible mediante una mayor inyección de energía. Esta se capta a través de los nichos ecológicos que ocupa el sistema, con lo que un cambio drástico en la balanza de captación energética puede suponer su colapso o su retracción hacia estrategias organizativas anteriores o menores.

Dicho de otro modo, los sistemas complejos son sumamente frágiles debido a la dependencia de un alto *input* energético. Este asunto tiene un claro reflejo en las denominadas sociedades occidentales contemporáneas, cuyas estructuras complejas son incomprensibles sin el aporte energético proveniente del carbón, la electricidad, el petróleo o la fusión nuclear. Además, estas formas de introducir energía pueden tener a la larga efectos colaterales en los ecosistemas, acciones inhibitoras que pueden llegar a frenar el proceso autocatalítico. Un ejemplo histórico lo podría constituir el accidente nuclear de Chernóbil (Ucrania). La cercana ciudad de Pripyat (al norte de la región de Kiev) llegó a tener una población de 49.400 personas que vivían directa o indirectamente de la central nuclear, la cual había generado unas condiciones de vida muy prósperas. El 26 de abril de 1986 tuvo lugar el famoso accidente en el reactor 4 de la central, el cual hizo colapsar y des poblarse no solo a esta ciudad, sino un área de 30 km de radio en torno a Chernóbil (fig. 8).

Volviendo al campo de la teoría, no debe contemplarse la idea de red como un sistema aislado, ya que determinados nodos interactúan con elementos de otras redes, y cuando un nodo externo está capacitado para actuar con mayor eficiencia dentro de un sistema ajeno al suyo<sup>16</sup>, un proceso de presión selectiva terminará potenciándolo y desplazando a su oponente, con lo que se terminará incorporando a dicha red como parte integrante de la misma (Schneider & Sagan 2009: 140-141). En este sentido, el astrofísico Erich Jantsch fue un firme defensor de no solo contemplar las partes internas de un sistema *autoorganizado*<sup>17</sup>, complejo y abierto, sino también las externas, ya que estas

---

16. ¿Cómo podemos discernir qué subsistema o nodo es el más efectivo? Lejos de cualquier definición que pueda caer de lleno en posicionamientos de corte moralizante (incluido el ecologismo), desde una perspectiva termodinámica la efectividad se mide en función de la materia y de la energía que el nodo, ya sea externo o interno, aporta al sistema (Schneider & Sagan 2009: 140), teniendo ello unas repercusiones, tal y como hemos venido esgrimiendo en el texto principal.

17. Ponemos en cursiva el prefijo «auto» porque en realidad los sistemas no se organizan por sí mismos, sino que dicho orden es una imposición derivada de los gradientes inmediatos o relacionados con este. Por tanto, lo más coherente sería calificar a este tipo de sistemas complejos como «otro»-organizados (Margulis & Sagan 2003: 82).

últimas pueden terminar siendo novedades que terminarán incorporándose al conjunto en función de sus características y de las circunstancias dadas. En la parte superior de la red de la fig. 9 observamos un nodo independiente que, pese a su proximidad, no está conectado a esta mediante ninguna arista. La evolución de la red podría ser tal que, en determinadas circunstancias, dicho nodo independiente podría engancharse al marco de interacciones e incluso desconectar y suplantar a otro, como indicamos.

Margulis y Sagan (2003) han explorado esta vía para comprender las relaciones de múltiples casos de relaciones simbióticas. Las simbiosis son asociaciones entre distintos tipos de organismos que terminan dando pie en una nueva realidad biológica. Tales especies pueden aproximarse entre sí ya sea por razones mutualistas (+/+) o parasitarias (-/+) que terminan desembocando en relaciones de convivencia. Sea como fuere, lo importante es que se llega un punto en el que tales especies no pueden existir de forma independiente. Es más, a largo plazo puede desembocarse en un proceso de simbiogénesis en el que se procede a la transmisión horizontal de genes entre los organismos implicados (Margulis & Sagan 2003: 36-37).

Pongamos un par de los tantos ejemplos citados por estos autores. Uno de ellos podría ser el caso de las especies de plantas del género *Ardisia*. Las hojas de estos vegetales presentan una morfología alabeada de origen bacteriano. En ellas viven microorganismos muy concretos que son además simbioses heredados a través de la flor y del embrión. Cuando estos se eliminan, las hojas de *Ardisia* crecen mutiladas y la planta no puede florecer ni reproducirse. Este proceso de simbiosis tuvo lugar cuando se potenció la relación de interdependencia entre tales plantas y bacterias del suelo que le suministraban sustancias promotoras del crecimiento (Margulis & Sagan 2003: 97-98). El otro caso ilustrativo que podríamos poner sobre la mesa es el de las vacas –*Bos primigenius taurus*–. Esta especie animal no podría digerir la celulosa de las plantas que ingiere sin la ayuda de los simbioses microbianos que se alojan en su rumen o panza (fig. 10); por tanto, su vida hoy en día es inconcebible sin ellos (Margulis & Sagan 2003: 39-40).

El animal humano no está tampoco exento de esta realidad simbiótica. Estudios recientes apuntan hacia una flora intestinal compuesta por 100 billones de bacterias que se distribuyen entre 500 y 1.000 especies diferentes. Hasta tal punto llega la dependencia biológica entre este gran conjunto biológico que los especialistas están empezando a hablar de un auténtico ecosistema intestinal en el cual el anfitrión proporciona hábitat y nutrición mientras que los microorganismos simbioses contribuyen a la fisiología de este, ya que resultan fundamentales de cara al correcto funcionamiento de procesos como la nutrición, el metabolismo, la prevención de infecciones y el desarrollo del sistema inmunológico (Guarner 2007: 15). Todos estos ejemplos nos permiten comprender cómo ciertos elementos que en el pasado evolutivo fueron agentes externos a un sistema dado, fueron captados por dicha red y constituyeron un nodo más de la misma debido a su eficiencia de cara a la nueva trama de relaciones biológicas.

Pero tales procesos exceden a lo somático y también tienen su reflejo en el ámbito de lo extrasomático. Desde hace unas décadas la antropología comenzó a superar la oposición entre las tesis difusionistas y las antidifusionistas para entender que las sociedades

---

No obstante, y debido a la extrañeza de este segundo término, consideramos más oportuno redefinir el concepto de autoorganización, tal y como acabamos de hacer.





Figura 8. Actual estado del Palacio de la Cultura Energetik, en la ciudad fantasma de Pripyat, cerca de la central nuclear de Chernóbil (Ucrania).

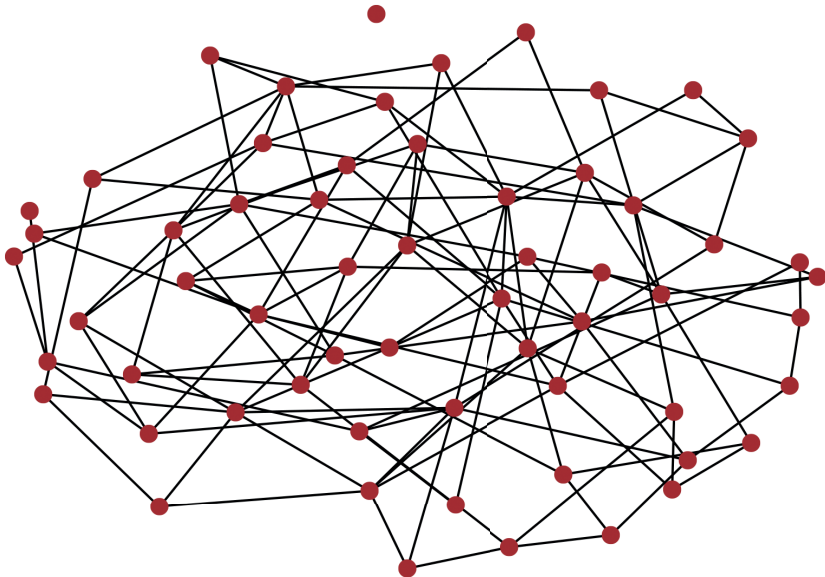


Figura 9. Grafo de red compleja generado a partir del modelo Erdős-Rényi. N° de nodos = 60; Probabilidad de enlace = 0.07; N° de aristas = 125.

humanas experimentan en mayor o menor grado tanto procesos de endoculturación como de difusión o aculturación (Harris 2004: 144 y 149-151; Kottak 2006: 72-73). Muchos elementos culturales externos son captados o asimilados por los grupos humanos, incorporándose así a su sistema sociocultural como un nodo más de la red, pudiendo incluso sustituir o contrarrestar el peso de otros elementos preexistentes. Piénsese por ejemplo en la gran cantidad de productos alimentarios de origen americano cuyo consumo se extendió por buena parte de las sociedades modernas a partir de los siglos XV y XVI, tales como la papa, el tomate, el pimiento, el maíz, etc., y sin los cuales no podríamos entender la gastronomía actual de muchos países del mundo.

Citamos literalmente a Schneider y a Sagan (2009: 140) para comprender otro de los aspectos esenciales de los procesos cíclicos y el análisis en red de los mismos: «Ulanowicz señala el hecho sobrecogedor de que los procesos autocatalíticos abiertos sobreviven a sus componentes materiales». Esto quiere decir que, precisamente al tratarse de procesos en los que el cambio es una constante, el hecho de que un nodo refuerce o debilita sus relaciones respecto a otros, o que sea sustituido, es un carácter relevante para la comprensión sobre la dinámica de la red, pero que de ninguna manera supone forzosamente la eliminación del sistema. Recordemos, en este sentido, el enunciado de la primera ley de la termodinámica: la energía y la materia ni se crean ni se destruyen, se transforman. Y es precisamente el cambio el resultado del segundo principio. A este respecto debemos aludir a Jeffrey S. Wicken, quien entendía la vida como organizaciones autocatalíticas informadas impulsadas por la segunda ley. Wicken, desde la TNE, sostuvo que la tendencia a la entropía es fundamental para la comprensión del universo y, por tanto, de los sistemas vivos. La segunda ley de la termodinámica organiza la vida desorganizándola. Siguiendo con la cita de Schneider y Sagan:

Esta es una de las razones por las que la vida es tan difícil de definir: no se trata de una cosa sin más, sino que es algo abierto; recluta nuevos objetos, nuevos materiales y nuevos genomas, así como partes del entorno en sus ciclos expansivos (Schneider & Sagan 2009: 141).

Desde esta perspectiva debemos prestar atención al estudio de los ecosistemas para comprender sus dinámicas y las enmarañadas relaciones de sus componentes desde un constante estado de desequilibrio. Si pensamos en un sencillo ecosistema en el que, en un momento dado, se encuentren integradas tan solo veinte especies, se ha podido estimar una red de interrelaciones que gira en torno a las  $2,4 \times 10^{18}$  posibles conexiones directas e indirectas (Schneider & Sagan 2009: 237).

Las ideas que se han ido exponiendo pudieran llegar a parecer un mero desglose de teoría de sistemas, sin embargo son el resultado de observaciones sobre el funcionamiento de diversidad de ecosistemas llevadas a cabo por multitud de equipos de ecólogos desde los proyectos pioneros de G. Evelyn Hutchinson y Raymond Lindeman en la década de 1940. Por tanto, no se tratan de meras ideas en el aire, sino que presentan una apoyatura empírica sobre la que se ha venido y se sigue trabajando en biología. Aunque constituya una reiteración de lo mismo, hablemos ahora usando el lenguaje técnico de un ecólogo y no tanto el de un biofísico. Quizás esta reiteración sea más instrumental para movernos dentro del ámbito de las poblaciones de seres vivos, y entre ellas las del animal humano, pero sin perder nunca de vista la importancia de



Figura 10. Vacas lecheras alimentándose de hierba en las montañas de Austria.

la termodinámica y la relevancia de los «flujos» de energía regidos por sus leyes (Schneider & Sagan 2009: 235-257).

Para subsistir, las poblaciones de seres vivos que constituyen un ecosistema requieren nutrirse. En el proceso de nutrición están incorporando energía. Parte de esta energía se consume y se pierde en forma de calor y otra parte es transformada en materia. Entre las distintas especies que forman el ecosistema se producen interrelaciones –por ejemplo tróficas– que pueden ser ordenadas jerárquicamente en función de la disipación de la energía. Sin embargo no debe pensarse en un ecosistema como un todo uniforme, ya que tanto temporal como espacialmente se producen sucesiones entre las distintas especies que lo componen. La sucesión ecológica es

[...] un proceso incesante de acción y reacción que, con el tiempo, conduce a cambios tanto del ambiente como de la comunidad, sufriendo ambos una influencia y un ajuste recíprocos y continuos. [Resulta] ser un proceso de autoorganización [...]. Un ecosistema capaz de autoorganización puede pasar por diferentes estados; cualquier cambio que lleve a un estado más resistente a nuevas alteraciones es asimilado inmediatamente (Margalef 1978: 31).

Dichas sucesiones espaciotemporales quedan estrechamente vinculadas a los «flujos» energéticos (cf. García Rivero 2004: 13 y 29; Margalef 1978: 31-32). Pese a existir muchas variantes de sucesiones de especies, en líneas generales puede decirse que todas

parten de la colonización de una zona por especies o poblaciones caracterizadas por su capacidad de crecimiento rápido. Este tipo de poblaciones han sido denominadas especies *r*, y se caracterizan por su alta tasa de replicación, por la escasa cantidad de energía invertida en la mantención de la descendencia y la baja tasa de supervivencia de esta. La estrategia tipo *r* suele asentar la base ecológica para que progresivamente vayan incorporándose poblaciones de crecimiento lento. Estas son denominadas especies *K*, y a diferencia de sus predecesoras se caracterizan por reproducirse más lentamente, invirtiendo en su poca descendencia una gran cantidad de energía para asegurar así su supervivencia (Livi Bacci 2009: 13-14).

Las poblaciones *K* desplazarán a otras e irán agrandando el ecosistema en términos termodinámicos, ya que la energía y la entropía del ecosistema se incrementan con ellas, con lo que se las puede considerar eficientes disipadoras de gradientes energéticos y grandes recicladoras<sup>18</sup>. Ello es así hasta que las circunstancias ecológicas hacen que *input* energético no pueda compensar al *output* y el ecosistema decrezca para iniciarse un nuevo ciclo (García Rivero 2004: 29-30; Schneider & Sagan 2009: 258-259 y 267-268). En relación con sus incidencias sobre los ecosistemas, los efectos de estas coyunturas negativas –por ejemplo un incendio, una sequía, una pandemia o problemas económicos– pueden verse aminorados cuando la diversidad de especies dentro del ecosistema es mayor, y pueden verse acentuados cuando es menor (Schneider & Sagan 2009: 299 y 314). Si conectamos el panorama descrito con lo anteriormente dicho se observa cómo tales sucesiones ecológicas de carácter cíclico son, a fin de cuentas, fenómenos de auto-catálisis positiva y negativa.

Hacemos con esto un guiño a los arqueólogos del territorio, puesto que este criterio podría ser un importante elemento clasificador a la hora de analizar el poblamiento. El metabolismo exosomático de las poblaciones humanas *K*, al incorporar al ecosistema más materiales y energía, y al desprenderse de ellas más entropía, dejan una mayor cantidad de residuos que pueden ser rastreados, cuantificados y ponderados mediante técnicas y análisis arqueológicos.

Los ecólogos estiman la energía-entropía de las poblaciones y ecosistemas vivos midiendo la temperatura mediante distintos tipos de sensores –satelitales, acoplados a aeronaves, etc.– (Schneider & Sagan 2009: 269-288). Algo parecido puede hacerse para el caso de países occidentales contemporáneos atendiendo a las diferentes tasas de consumo energético, como por ejemplo el eléctrico: Aquellas zonas donde se registra una mayor densidad de consumo eléctrico suelen coincidir con núcleos poblacionales con un metabolismo endosomático y exosomático elevado, como ocurre con las grandes ciudades y aglomeraciones; en cambio, el descenso de este parámetro es parejo a un menor metabolismo endosomático y exosomático, coincidente con zonas menos habitadas y con una población más dispersa (fig. 11).

---

18. Una de las características de las poblaciones *K* dentro de un ecosistema es que, para optimizar la energía de la que disponen, en vez de dejarla escapar intentan reciclarla al máximo dentro del sistema, evitando todo lo posible las fugas energéticas. Aunque evidentemente en su seno tienen cabida los materiales exógenos –los que provienen de fuera del sistema y son incorporados a este–, se aspira al incremento de los endógenos mediante el reciclado (Schneider & Sagan 2009: 253-254).



Figura 11. Fotografía de la península ibérica de noche tomada desde la Estación Espacial Internacional el 26 de julio de 2014 (NASA, Expedition 40).

Sin embargo, los arqueólogos trabajamos con poblaciones muertas a cuyo conocimiento nos aproximamos a través de los residuos que nos han dejado –su metabolismo exosomático fosilizado–, siendo por ello irrelevante la cuantificación de la variable térmica. En una reciente investigación hemos podido analizar el metabolismo exosomático de una red de yacimientos arqueológicos e incluso el que internamente presenta un único yacimiento a partir del cálculo de la entropía (Pérez-Aguilar 2018b). Pero también pueden estimarse tasas de consumo calórico a partir de los restos de alimentos documentados para aproximarnos al metabolismo endosomático que tuvieron tales poblaciones (Shawcross 1968 y 1972).

## TERMODINÁMICA Y COMPLEJIDAD

El alto número de combinaciones entre los elementos que componen una red ecológica y el gran dinamismo que presentan los ecosistemas ha llevado a muchos investigadores a adentrarse en el mundo de la denominada teoría de la complejidad. Dicho ámbito de estudio comenzó a desarrollarse a partir de la década de 1970, atrayendo la atención de un gran número de estudiosos de distintas disciplinas, tales como físicos, matemáticos, informáticos, biólogos o científicos sociales. Este tema podría dar lugar a decenas de páginas dentro de esta obra debido a la abundante bibliografía existente. Sin embargo, no pretendemos analizar detalladamente las vicisitudes de dicho ámbito de estudio ni la

infinitud de posicionamientos existentes tanto dentro como fuera de su seno<sup>19</sup>. Nos preocupa analizar más bien una cuestión relacionada con la termodinámica: ¿por qué surgen los sistemas complejos?

Un sistema complejo se diferencia de uno simple por ser un sistema grande, no tanto en relación a su tamaño físico como al número de partes que lo componen. Pero un rasgo determinante de estos tipos de sistemas es que son muy reactivos (Kauffman 1999: 128-129), es decir, hay una alta cantidad de interacciones entre sus distintas partes. Las investigaciones que el físico danés Per Bak hizo en la década de 1980 demostraron igualmente que otro rasgo elemental de los sistemas complejos es que son energéticamente abiertos (Gribbin 2006: 242-243 y 251).

Pero además, los sistemas complejos presentan una dinámica caótica. La palabra «caos» suele interpretarse en la literatura de dos formas. La primera de las acepciones es la más extendida y vulgar. Hace alusión al significado de la palabra tal y como la entendieron los antiguos griegos: un proceso totalmente aleatorio e impredecible de principio a fin. El problema de entender los procesos caóticos desde esta semántica radica cuando esta se traslada injustificadamente al ámbito científico, donde el término cobra un significado distinto. Esto ha ocurrido sobre todo en el ámbito de las humanidades, donde se ha dado la pomposa tendencia de emplear palabras para disfrazar de científicidad discursos que en el fondo están huecos de contenido. Así, algunos investigadores de este ámbito se han atrevido a hablar sin propiedad de procesos «caóticos» o «complejos» en alusión a aquéllos de difícil comprensión, haciendo equivaler tales términos al de «confusión». Esto resulta totalmente reprochable e incorrecto a nivel científico, pues no existe confusión en el caos sino en la mente del que lo contempla.

Cuando la palabra «caos» se emplea como tecnicismo científico tiene un significado muy concreto. Hace referencia a un tipo de proceso en el que existe una incoherencia de elementos o de eventos, ya que suceden de forma aleatoria, sin responder a un orden aparente (Margalef 1998: 894; Schneider & Sagan 2009: 58-61). Pero ese desorden perceptible en la trayectoria sí puede determinarse, ya que dentro del proceso de cambio un paso es consecuencia de otro, pudiéndose incluso hacer predicciones a corto plazo.

Un sistema simple en constante cambio puede ser definido matemáticamente de una forma sencilla mediante ecuaciones lineales; sin embargo, un sistema complejo es caótico porque en su dinámica de cambio se produce una serie de hechos que solo puede ser descrita mediante ecuaciones no lineales o diferenciales. Existe un punto crítico en

---

19. A grandes rasgos, Edward O. Wilson (1999: 131-135) ha realizado una breve exposición de las tres posturas fundamentales dentro de los estudios de la complejidad. Por una parte quedarían aquellos estudiosos que, desde posiciones heterogéneas, asumen este tema desde el escepticismo, entendiendo que la complejidad es tan complicada que es difícil entenderla sobre la base de una serie de sencillos principios. De otro lado quedan todos aquellos defensores de la ciencia de la complejidad, encabezados por Stuart A. Kauffman y Christopher G. Langton desde el Instituto de Santa Fe en Nuevo México. Ellos esgrimen la idea de una serie de leyes que funcionan en la construcción y variación de los sistemas complejos. Para la comprensión de estos principios y del dinamismo de tales sistemas hacen uso de diferentes algoritmos, modelos matemáticos y de programas informáticos en los que recrean redes complejas. Por otra parte existen autores —entre los que se encuentra el propio Wilson— que están a caballo entre los dos primeros e irreconciliables bandos. Estos consideran que los estudiosos de la complejidad están en el buen camino, pero que existe una insuficiente documentación sobre tales fenómenos, una carencia de datos empíricos que requiere un trabajo de campo previo antes de montar sistemas complejos en computadoras y aplicarles fórmulas matemáticas para dilucidar sus funcionamientos.

el que se entra en un proceso caótico debido a la alta sensibilidad del sistema al mutar y a las condiciones aleatorias del mismo. Esto hace que, pese a conocerse las condiciones iniciales del sistema, no podamos predecir el estado final de este. Cada pequeño cambio dentro de la trayectoria se apoya sobre la base de la configuración inmediatamente anterior, y no de las restantes (D'Antoni 2008: 24-25; Gribbin 2006: 115-118 y 166; Wilson 1999: 135). Así, entramos en una dinámica en la que en «medio del orden existe el caos; pero en medio del caos hay orden» (Gribbin 2006: 124). Todo esto que hemos dicho ha sido también expresado por Ramón Margalef, quien comenta que:

La pretendida descripción matemática de un ecosistema no define su manera de operar en el futuro. En el mejor de los casos, podrá sugerir ciertas características atribuibles a un mecanismo de decisión que influirá sobre futuras probabilidades de cambio, todavía imprecisadas. En realidad, se exige ir sustituyendo un modelo matemático por otro, reemplazando los sistemas de ecuaciones. [...] Esto se consigue, hasta cierto punto, por medio de la llamada programación dinámica que se basa en una cadena de Markov (cada estado solo depende del precedente y es independiente del estado y condiciones iniciales) (Margalef 1998: 904).

Después de haber reflexionado sobre la naturaleza de los sistemas complejos, retornemos a la pregunta esencial que se ha planteado: ¿por qué se originan? Autores como Eric D. Schneider y Dorion Sagan (2009: 151 y 156) entienden que estos surgen como resultado de la aparición de un gradiente energético –por acción de la segunda ley–, teniendo tales sistemas la finalidad de eliminar tal diferencia –disipar el gradiente– y exportar caos molecular al medio. Por su parte, Daniel García Rivero (2004: 19) sugiere que el aumento de la complejidad de los sistemas biológicos se debe a la evolución por variación y retención selectiva. En el próximo apartado destacaremos la íntima relación que existe entre la evolución y los principios de la termodinámica, pero si consideramos esta en los términos en los que fue descrita por Charles Darwin, tenemos que el azar es un factor clave para comprender los procesos de modificación y de selección. La evolución, por tanto, es un proceso caótico, y por ende complejo.

En humanidades existe el vicio de contemplar casi todo lo relativo a nuestra especie, sobre todo aquellos fenómenos que tienen algo que ver con la inteligencia humana, lo cultural y lo artificial, desde una perspectiva que acentúa la complejidad de lo estudiado, en contraposición con la naturaleza de otros seres vivos y no vivos, que participan de una menor complejidad, o lo que es lo mismo, de una mayor simplicidad (García Rivero 2004: 21). Aquí se vuelve a poner de manifiesto la pobreza resultante del estancamiento académico de las disciplinas. Tales barreras o compartimentos hacen inclinarse a los humanistas hacia actitudes antropocéntricas, exaltándose al ser humano, objeto de su estudio, por encima del resto del universo. Sin embargo, el estudio de una parcela del universo mayor a la del género *Homo* nos lleva a poner sobre la mesa la existencia de una multitud de sistemas complejos no humanos que deben ser tenidos en cuenta para intentar comprender tanto sus funcionamientos como la razón de ser de la complejidad sistémica (cf. Prigogine 1997: 15-16).

En última instancia, una entidad compleja no deja de ser una forma de disipar energía a través de sus fronteras para deshacer un gradiente energético. El carácter abierto de tales fronteras es lo que permite que el sistema siga existiendo y ganando complejidad

debido al incremento de la entropía y de la energía que en él circula (Gribbin 2006: 243; Schneider & Sagan 2009: 152).

Ejemplos de sistemas complejos no humanos, que surgen justo antes de que se desencadene el caos (Gribbin 2006: 167 y 169-170), son las «células» no vivas de Bénard-Rayleigh, con posibles formas dinámicas a modo de hexágonos, cilindros, círculos, líneas, espirales y cuadrados. Estas formas complejas pueden hacerse mediante experimentos de laboratorio en los que se genera un gradiente térmico sobre un fluido. Pero se trata de un fenómeno cuya existencia trasciende las paredes de los laboratorios, ya que encontramos estas «células» no vivas repartidas por la naturaleza (fig. 12). Las formas espontáneas que se generan utilizan el gradiente para su propia organización y mantener sus estructuras. La gran diferencia entre estas «células» no vivas y las vivas es que las primeras carecen de la capacidad de buscar nuevos gradientes para mantener el sistema de no equilibrio (Schneider & Kay 1999: 225-226; Schneider & Sagan 2009: 152-165). Cuando el gradiente originado sobre el fluido es de presión pueden originarse vórtices de Taylor o remolinos de agua (Schneider & Sagan 2009: 166-173).

En síntesis, un sistema complejo se caracteriza por una serie de rasgos fundamentales (cf. Tyrtania 2009: 104-113):

1. Es un sistema termodinámico abierto que disipa gradientes energéticos para mantener su estructura.
2. Varía de forma caótica, es decir, siguiendo una dinámica azarosa que puede ser descrita en términos de ecuaciones no lineales.
3. Las partes que componen el sistema deben estar conectadas entre sí en un alto porcentaje, de tal modo que exista una profunda interacción entre las mismas a la hora de intercambiar energía e información.
4. La gran interrelación existente entre las partes del sistema hace que este sea altamente sensible, de tal forma que un cambio a nivel local en uno de los nodos puede amplificarse a escala macro, dando lugar a un nuevo estado configuracional.
5. Existen tendencias de retroalimentación debido a la permeabilidad de las fronteras del sistema y de los nodos que lo componen. En razón de esto, el *output* de energía de un sistema o de un nodo puede llegar a ser el *input* de otros y viceversa.
6. Las fronteras actúan en este sentido como agentes estructurados y estructurantes. No debe pensarse siempre en fronteras en el sentido de entidades tangibles a nivel macroscópico. Estas pueden ser igualmente rasgos limitantes que impone el medio con el que se interactúa y del que forma parte el sistema en su conjunto para poder mantenerse energéticamente. Un ejemplo de factor limitante podría ser el volumen o el tamaño del sistema en sí mismo: Si para mantenerse requiere una cantidad de energía imposible de ser proporcionada por el medio, se producirá una transición de fase para corregir el gradiente. Dicho de otra manera, ante tal tesitura se produciría una sucesión ecológica que restaría complejidad al sistema. Como advierte García Rivero (2004: 29), en estos ciclos se refleja claramente que la evolución no es lineal, que el aumento de la complejidad no es una constante, no debiéndose ello entender en clave moral, ya que simplemente se trata de un reajuste encaminado a disipar gradientes energéticos de una forma más eficiente ante unas nuevas circunstancias ecológicas.





Figura 12. Formación de células de Bénard-Rayleigh en la superficie del Salar de Uyuni (Potosí, Bolivia).

Conectando con esta última idea, sí se han esgrimido modelos predictivos relativos a la dinámica de los sistemas energéticos que se apoyan en los principios de la TNE. *Grosso modo* existen dos tendencias evolutivas complementarias que vienen definidas por los teoremas de Lotka –principio de maximización del «flujo» energético– y de Prigogine –tendencia de los sistemas complejos a minimizar la entropía interna–. A partir de tales conceptos teóricos se ha planteado que los sistemas tienen una tendencia general básica caracterizada por una fase inicial de rápida expansión que termina moderándose cuando las condiciones externas lo obligan, dando lugar a una fase intermedia de estabilidad relativa –estado estacionario– y algún tipo de episodio final –donde tienen cabida las ya citadas sucesiones ecológicas– que da paso a un nuevo ciclo termodinámico. Todo este proceso descriptivo se explica a nivel ecológico a partir de procesos de selección darwiniana (Tyrtania 2009: 98-101).

La existencia de complejidad biosistémica no puede entenderse sin procesos de autopoiesis. Esto sucede cuando una entidad tiene capacidad replicativa, siendo el resultado otras entidades que presentan estructuras semejantes. Dicho de otra forma, la autopoiesis es un proceso dinámico a partir del cual una entidad biológica está capacitada para automantenerse y producir estructuras semejantes a ella (Margulis 2003: 280). Este concepto, propuesto por Humberto Maturana y Francisco J. Varela (2003), recuerda al de autocatalisis. No obstante, debe recordarse que si bien es cierto que los seres vivos responden a

una dinámica de autopoiesis, esta solo es posible siempre y cuando estén conectados a un «flujo» energético. En este sentido una célula viva no se diferenciaría de una «célula» no viva de Bénard, salvo por su capacidad etológica para seguir buscando gradientes energéticos que disipar –por ejemplo, mediante la reestructuración de las fronteras en el caso de poblaciones– y así poder replicarse.

Esta serie de ideas nos lleva a poner sobre la mesa uno de los puntos centrales de esta obra y sobre el que volveremos luego: consideramos que las poblaciones humanas y sus entramados culturales son sistemas complejos cuya razón de ser evolutiva no puede ser comprendida sin el desarrollo de una lectura energética.

## TERMODINÁMICA, SELECCIÓN NATURAL Y DIRECCIÓN EVOLUTIVA

Después de haber desarrollado con cierta profundidad diferentes nociones relacionadas con la termodinámica, conviene reflexionar sobre el nexo de esta con la teoría de la evolución darwiniana. Recientemente Philip Ball (2008:48) ha llegado a afirmar que la «termodinámica es la ciencia del cambio y, sin cambio, no hay nada que decir». La teoría darwiniana trata de explicar los cambios o transformaciones de la vida. Por tanto, carece de sentido disociar los enunciados de esta respecto a los de la termodinámica, pues estos son más genéricos e incluyen a los primeros. Las entidades vivas no dejan de ser sistemas energéticos, y por ello no cabe análisis posible de su evolución al margen de las leyes que explican cómo la energía se transforma. Conviene recalcar esto, pues en cierta ocasión, hablando con un colega cuyo nombre aquí se omitirá, nos llegó a plantear que la termodinámica estaba muy bien para explicar la evolución de las estrellas y del universo en general, pero que a la hora de enfrentarnos a la comprensión de los seres vivos y de sus entramados socioculturales había que usar únicamente el modelo darwiniano –¿cómo si las entidades biológicas no fueran parte integrante del universo!–. Lo que más nos impactó de esta afirmación es el antagonismo que nuestro colega parecía contemplar entre ambos marcos explicativos.

Ya en la década de 1990 Ilya Prigogine observó que tanto la termodinámica como la biología darwiniana eran ciencias de evolución –del cambio–. Sin embargo, mientras que los postulados clásicos de la primera se aferraban a la idea de una dirección evolutiva encaminada a la desintegración, a la muerte térmica del universo, el darwinismo apuntaba hacia la tendencia de un orden que se incrementaba a partir de la aparición de nuevas especies, adaptaciones, construcción de nichos ecológicos, etc. (Prigogine 1997: 18-19). Ya hablamos de este asunto con anterioridad, haciendo referencia a la figura de Erwin Schrödinger a la hora de resolver la citada paradoja, y asentando los pilares básicos de la TNE.

Si bien los físicos han sido por lo general receptivos a la solución de Schrödinger, todavía existe un amplio número de pensadores evolucionistas que se niega a considerar que la evolución tiene una dirección funcional: la marcada por los principios termodinámicos. La biología darwiniana clásica tiende a rechazar tal hecho por cuestiones de índole histórica: el tradicional choque con la religión y con el evolucionismo lamarckiano, los cuales asumen cambios teleológicos (cf. Margulis & Sagan 2003: 82-83). No obstante, si se analiza el asunto desde una perspectiva termodinámica se verá cómo no

existe una contradicción teórica entre lo aquí planteado y el modelo darwiniano, sino que este sale reforzado (Wilson 1999: 83).

Estamos de acuerdo con Schneider y Sagan (2009: 365) cuando afirman que «todos los sistemas TNE tienen una función natural básica: reducir un gradiente ambiental». Los seres vivos, incluido el animal humano, comparten dicha función. La reducción de gradientes es una imposición del segundo principio de la termodinámica a todos los sistemas energéticos existentes y, por tanto, todos estos sistemas y sus cambios –la evolución–, están encaminados en el marco de dicha función. Esto podría parecer otra variante teleológica, pero no es así. Recordemos en este sentido la reflexión de Ernst Mayr anotada en las primeras páginas del libro, y que permite definir este asunto como una imposición teleomática, al ser el resultado de una ley física. A decir de Schneider y Sagan (2009: 372), «la vida parece ser un ascenso teleonómico de la segunda ley teleomática».

El darwinismo ha permitido rechazar con contundente evidencia la noción evolutiva de corte lamarckiano, que además de teleológica se caracteriza por ser antropocéntrica, pues entiende que los cambios evolutivos son dirigidos mediante la voluntad, siendo el culmen del proceso evolutivo el ser humano –o alguna de sus razas o culturas–. La evolución darwiniana clásica plantea la no direccionalidad del cambio<sup>20</sup>, siendo la presión selectiva la que, en función de las circunstancias, fija unas variantes en detrimento de otras que terminan siendo marginales o desapareciendo.

Sin embargo, para comprender el proceso de presión selectiva debemos tener en cuenta que este favorece las tendencias orientadas a la maximización de nuevos replicadores, y estos son en última instancia partes del sistema energético para disipar gradientes. Por tanto, la selección natural, a fin de cuentas, potencia aquellas estrategias reproductoras que permiten que el sistema siga su curso termodinámico (cf. Adams 2007: 78; Eigen 1999: 22; García Rivero 2004: 18-19). La dirección que ejerce la presión selectiva sobre la vida se encuentra de este modo determinada por las leyes de la termodinámica, puesto que potencia a la larga a aquellos organismos, poblaciones y ecosistemas que, en función de un contexto dinámico, disipan mejor los gradientes de energía (Adams 2007: 78-79; Margalef 1998: 898 y 904; Margulis & Sagan 2003: 83; Schneider & Sagan 2009: 194-195, 278, 292-296, 311-316, 363).

Esto es lo que se conoce como el principio de Lotka, y postula que la acción de la selección natural termina incrementando la biomasa y el «flujo» energético total del sistema (Tyrtania 2009: 88). En razón de ello, Leonardo Tyrtania entiende que:

Los procesos naturales se acoplan y se combinan espontáneamente conformando sistemas desde el sustrato físico, pasando por el biológico hasta el social. Los agregados jerárquicos resultantes maximizan el flujo energético a través del sistema inclusivo mayor y minimizan la producción de entropía de sus componentes individuales (Tyrtania 2009: 85).

---

20. Incluso la no direccionalidad del cambio se encuentra determinada por el segundo principio de la termodinámica, pues este promueve una tendencia al desorden. Jeffrey S. Wicken llegó a afirmar que la «segunda ley promueve teleomáticamente errores de replicación que incrementan la aleatoriedad configuracional. Por esta ley, la replicación no puede estar libre de error» (Schneider & Sagan 2009: 293).

Retomando la última idea de este autor, debe evitarse la asociación directa entre una alta tasa de energía/entropía y un elevado grado de complejidad. En los procesos energéticos lo más eficiente no es siempre incorporar mucha energía y exportar directamente toda la entropía que se pueda, sino que los ecosistemas más óptimos como degradadores son aquellos que aprovechan al máximo la energía incorporada mediante procesos de reciclaje interno. En ellos se incorpora toda la energía que se pueda, y a la larga esta se disipa en el frío espacio a modo de entropía, pero se la intenta retener dentro de la red ecosistémica todo lo que se pueda para ir degradándola lo más lentamente posible –baja entropía–. Esto es lo que se denomina como el principio de Zotín (Tyrtania 2009: 96).

Por ello los ecólogos entienden que los ecosistemas clímax se caracterizan por su «abundante» biomasa y por presentar temperaturas «bajas» en términos comparativos (García Rivero 2004: 29; Margalef 1998: 900-901; Schneider & Sagan 2009: 290-291). Dicho de otro modo, no solo hay que prestar atención al incremento constante del consumo de energía, ya que un sistema tendrá ventajas selectivas sobre otros cuando se ajuste mejor que estos a las posibilidades reales de consumo energético. Una estructura que para mantenerse como tal requiere de un aporte X de energía dentro de un medio de relaciones que le proporciona X-10 de energía, estará en desventaja en relación con otro sistema cuya tasa de consumo se ajusta a la cantidad real que puede proporcionar el medio. Por tanto, el primero de los sistemas tendría que ajustarse de alguna forma a la disponibilidad de energía del contexto en el que se inserta para guardar cierta distancia del equilibrio termodinámico o bien tendría que redefinir sus fronteras para poder incorporar más energía en sus ciclos (Tyrtania 2009: 95-96).

De otro lado, debe recalcar un hecho evidente: toda la energía que se incorpora a un sistema a través de sus fronteras se hace a costa de incrementar el desorden –la entropía– fuera del sistema (Atkins 2008: 96; Escacena 2009: 472). En este sentido, y para ilustrar el caso, resulta interesante citar un ejemplo comentado por el artista estadounidense Robert Smithson durante una entrevista publicada póstumamente:

—[...] fundamentalmente creo que a los arquitectos se les escapan estas preocupaciones y pienso en otro problema que también existe, el de la recuperación de minas. Parece que cuando se prepararon las leyes para la recuperación de minas querían restaurar las minas tal y como eran antes de haberlas explotado. Es una verdadera manera Humpty Dumpty de hacer las cosas. Puedes imaginar el resultado cuando se trata del pozo de Bingham en Utah, un pozo de 1,6 km de profundidad y 4,8 de anchura. La idea de una ley tan general y que no trata realmente con un sitio específico como este parece desafortunada. Un empleado de la Kennecott Mining Company me dijo que la empresa iba a rellenar el pozo; ante lo que uno, por supuesto, se pregunta de dónde iban a sacar el material para rellenarlo.

—¿Se lo preguntaste?

—Sí, me dijeron que llevaría unos treinta años y que tendrían que coger la tierra de otra montaña. Parece que las leyes de recuperación de minas no tratan con emplazamientos específicos sino con un mundo de ensueño o un mundo ideal largo tiempo desaparecido. Se trata de recuperar una frontera o una tierra salvaje que ya no existe. En este caso debemos aceptar la situación entrópica y aprender más o menos a reincorporar estas cosas que parecen feas. De hecho, existe un conflicto de intereses. Por un lado, están los ecologistas idealistas, y, por otro, los mineros deseosos de obtener beneficios [...]. El ecologista afirma rotundamente que las minas a cielo abierto son simplemente feas y el minero sostiene que la belleza está en los ojos de quien mira (Smithson 2010: 56-58).

Pese a ello, los principios de máxima y mínima producción de entropía no son antagónicos, como pudieran llegar a parecer. Harold J. Hamilton planteó que en un contexto dado, el aumento general de la entropía de un sistema puede ir parejo al descenso de la tasa de producción de entropía en alguna de sus partes (Tyrtania 2009: 92). La selección natural capta y/o potencia los nodos e interacciones que definen un sistema en función de la capacidad de estos a la hora de reforzar o de incrementar la estructura disipativa del sistema mismo. Esto solo es posible cuando el *input* energético es superior al *output*, o dicho de otra manera, cuando la entrada de energía es superior a la entropía del sistema. Sin embargo, y con ello volvemos a la idea de Hamilton, para poder mantener constante la tasa de producción de entropía este proceso evolutivo origina un aumento en la entropía del entorno que rodea al sistema, y con el que se relaciona de cara a la captación de energía (Tyrtania 2009: 91-92 y 117).

Dejando dicho asunto a un lado, debe remarcararse que la idea de entender el mecanismo de selección desde un enfoque termodinámico no es algo nuevo. Fue el codescubridor de este principio darwiniano, Alfred Russel Wallace, el primero en apuntar en dicho sentido: «La actuación de este principio [la selección] es exactamente igual que la del regulador centrífugo de un motor de vapor, que controla y corrige cualquier irregularidad antes de que se haga patente» (Wallace 2009 [1858]: 390-391). Dicho de otra forma, los procesos selectivos terminan potenciando las pautas que en un contexto dado disipan gradientes energéticos de una forma más eficiente, hecho que en la mente de Wallace recuerda a la reducción de gradientes de presión por parte de las máquinas de vapor a través de las válvulas de escape.

La retención selectiva de unos afecta necesariamente a la trayectoria de otras entidades disipativas (Tyrtania 2009: 114). No obstante, no debe considerarse tampoco la eficiencia termodinámica en términos progresivistas:

La ley de la entropía indica que los límites de la expansión sí existen. Esta podría ser una mala noticia para quienes confían sin reparo en las soluciones tecnológicas [...]. Generalmente se piensa que el desarrollo tecnológico permite incrementar la capacidad de sustentación del planeta, o de cualquier otro sistema en particular, de manera ilimitada. Sin embargo, el hecho es que una tecnología «mejorada» produce mayor entropía. La elaboración de mejores materiales y técnicas más refinadas exige un gasto energético proporcionalmente mayor. A medida que crece la complejidad del sistema, el balance entrópico con el medio se hace cada vez más difícil de sostener. Sucede que una tecnología «más eficiente» destruye el medio natural más rápidamente que una tecnología sencilla (Tyrtania 2009: 119).

Nos recuerda Ramón Margalef (1978: 80) que la evolución de los organismos vivos solo puede comprenderse en el marco de relaciones ecosistémicas. Si bien le damos la razón en ello, debemos ser críticos cuando diferencia los procesos de selección –que para él actúan sobre organismos concretos– de aquellos otros de sucesión ecológica. Para Margalef, la selección de las especies termina acoplándose a los impedimentos del ecosistema y a los ritmos de la sucesión ecológica. Una concepción más amplia de la presión selectiva, en términos de selección multinivel (*vid. infra*), nos hace considerar que los procesos de sucesión ecológica no son otra cosa que la acción de la retención selectiva a nivel ecosistémico. Si bien es cierto que Margalef no asumía este criterio en tales

términos teóricos, supo describir a la perfección cómo unos elementos del ecosistema son cribados y sustituidos por otros:

La sucesión en cualquier sistema autoorganizable implica la sustitución de alguna pieza del sistema por alguna otra que permita el mantenimiento de la misma cantidad de información a un coste [energético] menor, o el mantenimiento de una mayor cantidad de información al mismo coste [energético] (Margalef 1978: 79-80).

Ahora bien, ¿tienen relevancia estas cuestiones desarrolladas a nivel teórico para comprender problemas del registro arqueológico? Pongamos el caso de las transformaciones que muchas ciudades comenzaron a experimentar en buena parte del mundo mediterráneo en época tardorromana. Citaremos, para ello, una serie de ideas anotada por Christian Witschel:

Mucho más fuerte fue la transformación de aspecto externo detectada en muchas pequeñas ciudades, existentes en gran número tanto en el este como en el sur de *Hispania*. También aquí, en la fase de expansión del urbanismo hispano de la segunda mitad del siglo I, se construyeron complejos públicos que, en parte, dominaban completamente los centros urbanos, pero que a menudo, tras dos o tres generaciones, resultaban demasiado grandes y costosos de mantener, en especial cuando se producían catástrofes naturales como terremotos. En consecuencia, estos edificios fueron relativamente pronto abandonados o reestructurados. Las nuevas imágenes urbanas surgidas a partir de finales del siglo II ya no estaban, por lo tanto, caracterizadas por la impresionante monumentalidad visual, sino que aparecían más bien –en contraste con lo que había sido el estándar en el Alto Imperio– como ciudades «desordenadas», habida cuenta de que, a menudo, los residuos se abandonaban directamente en la ciudad, que algunos edificios se dejaron en ruinas y que, en ocasiones, incluso los muertos eran enterrados en áreas adyacentes. [...] En muchos de estos lugares entre el III y el IV no se conocen *civic inscriptions*. Las evidencias arqueológicas, y en ocasiones también las fuentes literarias, indican sin embargo, que muchas de estas pequeñas ciudades habrían sobrevivido tras estas transformaciones hasta, al menos, el siglo V-VI. En ellas seguían viviendo muchas personas y los asentamientos podían ser relevantes como centros artesanales y comerciales, pero también como sedes de instituciones políticas y eclesiásticas (Witschel 2009: 494-495).

Dicho de otra manera, en el Alto Imperio Romano las ciudades se monumentalizaron hasta tal punto de que a finales del siglo II d. C. la situación se tornó insostenible para muchos de estos enclaves. En este mismo trabajo Witschel pone casos paradigmáticos de *urbes* hispanas con intereses en la pesca y la industria pesquera como *Baelo*, en la minería como *Munigua* y en la oleicultura como *Celti*. Estos sectores económicos entraron en recesión a finales del II d. C. en la Bética occidental (García Vargas & Bernal 2009; Chic 2005; Reynolds 2007).

En las ciudades el *output* comenzó a superar al *input* energético, y el evergetismo altoimperial se tornó insostenible por tales razones económicas. Las comunidades urbanas se vieron en la encrucijada de modificar la dinámica interna de sus asentamientos –como se hizo en la mayor parte de los casos– o de abandonarlos y migrar. Ante este proceso de criba selectiva parece que salieron beneficiadas aquellas conductas que optaron por modificar las pautas evergéticas así como por la reestructuración de los espacios

urbanos y por el reciclaje del material sobrante (*spolium*), pues son las que cuantitativamente más se constatan en el registro arqueológico. En resumidas cuentas, tanto la fisionomía que fueron cobrando las ciudades como los cambios en el *modus vivendi* de sus habitantes constituyen adaptaciones a las nuevas circunstancias del ecosistema como resultado de un proceso de presión selectiva (Pérez-Aguilar 2018b: 1250-1251).

Valga este breve ejemplo para demostrar la fertilidad explicativa de estos principios teóricos. Evidentemente los casos de estudio podrían ser otros tanto a nivel temático, geográfico como temporal, pues coyunturas semejantes suelen ser frecuentes a lo largo de la historia.

## TERMODINÁMICA Y CIENCIAS HISTÓRICAS

Muchos libros e investigaciones suelen comenzar abriendo un epígrafe en el que se expone un estado de la cuestión. Consideramos justificado el incluir este aquí, y no antes, debido a la complejidad conceptual de algunos términos que, de no haber sido explicados con anterioridad, harían incomprensible al lector no docto en la materia buena parte de lo que se dirá<sup>21</sup>.

La influencia teórica que ha tenido el desarrollo de la termodinámica sobre el pensamiento antropológico e histórico no es ninguna novedad presente. Pese a ser este un tema poco o nada abordado en manuales y asignaturas de tales disciplinas, la aplicación de la termodinámica a la comprensión de las sociedades y culturas humanas es casi tan remota como esta ciencia de la energía. Como ya hemos visto, en el propio ámbito de la termodinámica se han ido produciendo replanteamientos teóricos, redefiniciones de conceptos y enunciados, etc. Tales cambios también han tenido a la larga su repercusión en el campo de las humanidades.

En este sentido se pueden distinguir *grosso modo* dos grupos o etapas: una «político-moralista» y otra «heurística». Al hablar de una antes y de la otra después, no quisiéramos llevar a la confusión sobre una sucesión lineal separada por una nítida barrera cronológica. Ni siquiera la concepción de la TNE podría considerarse un elemento separador entre ambas, ya que, como se verá, existen autores pertenecientes al segundo grupo que desarrollaron sus estudios sobre la base de los postulados clásicos y viceversa. Para cada una de estas categorías hemos seleccionado a una serie de pensadores que consideramos representativos de movimientos intelectuales más amplios y cuyas obras pueden ayudarnos a comprender las tendencias apuntadas.

### La etapa o posicionamiento «político-moralista»

Se desarrolla sobre todo a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y los años iniciales del XX. El análisis de la sociedad que se hace durante tales décadas sobre la base de los principios de la termodinámica constituye un instrumento que tiene como objetivo

---

21. Una parte del contenido de este epígrafe ha sido publicada en L.G. Pérez-Aguilar (2019). No obstante, aquí presentamos una versión ampliada de dicho trabajo, incluyéndose y analizándose las obras de otros autores.

defender ideologías políticas y morales, tanto de corte capitalista como socialista, así como posturas religiosas, teístas o ateas. Por tanto, se trata de una tendencia, todavía en boga, que utiliza la ciencia para justificar o legitimar procesos e ideales. Como ha expresado Leonardo Tyrntania:

Cuando se divulgaron conceptos tales como los de energía, entropía, caos y orden, adquirieron un «exceso de significado» [...]. El exceso de significado se refiere a la inevitable interpretación de las ideas científicas de acuerdo con las convicciones íntimas de cada usuario o en función de las necesidades del momento. Esto suele dar por resultado un manejo relajado de nociones originalmente precisas (Tyrntania 2009: 14).

Uno de los rasgos a destacar entre los diversos intelectuales encasillados en esta categoría es que no eran de formación historiadores o antropólogos. La mayoría eran eruditos que profesaban disciplinas como la medicina, la farmacia, la ingeniería, la literatura, etc., pero que al estar interesados en conocer el pasado o la realidad social y cultural de su época, llegaron a plantear valoraciones o lecturas relativas a dichos temas.

El primer caso que pondremos sobre la mesa será el de Henry B. Adams, descendiente de los presidentes estadounidenses John Adams y John Quincy Adams. A diferencia de otros, Henry B. Adams sí fue historiador. Entre 1870 y 1877 impartió clases de Historia Medieval en Harvard, y sus anteriores labores como periodista entre Gran Bretaña y Norteamérica le habían llevado a interesarse notablemente en el periodo contemporáneo. En una carta dirigida a la American Historical Association, Adams reflexiona sobre la necesidad de encontrar una ley general de la evolución histórica (Adams 1894). Unos años más tarde, en su escrito *A letter to American teachers of History* (1910) analizó desde un tono moralizante y decadentista el tiempo que le había tocado vivir. Para ello se apoyó en el enunciado clásico del segundo principio de la termodinámica, ley que según él obligaba a todo lo existente a desordenarse, conduciendo hacia el caos a las propias sociedades y culturas de la especie humana (cf. Adams 1910)<sup>22</sup>.

A la España del llamado Sexenio Democrático (1868-1874) llegó una serie de publicaciones de distintos autores extranjeros que terminó influyendo en el pensamiento de diversos intelectuales nacionales. Entre ellas se encontraba el libro de Ludwig Büchner titulado *Kraft und Stoff* (1855), quien en función de la primera ley de la termodinámica defendía que el universo era eterno y cíclico (fig. 13). Tal obra, traducida al castellano bajo el nombre de *Fuerza y materia* (1868), se hizo bastante popular entre los materialistas y ateos españoles para rechazar la idea de un dios creador (Pohl 2009: 126). La reacción no se hizo esperar dentro de un clima liberal donde el prestigio de la ciencia se iba imponiendo a un ritmo galopante como eje estructurador de cualquier tipo de argumento racional. De este modo, ingenieros con ideales conservadores y de corte católico, como José Echegaray, Gumersindo Vicuña y Lazcano o Francisco de Paula Rojas y Caballero-Infante, trataron de armonizar la idea de dios con los enunciados de la termodinámica (Pohl 2009: 130-131).

---

22. Un excelente trabajo en el que se expone el bagaje moral y político que heredó y del que participó Adams puede encontrarse en la obra de A. Herman (1998: 153-191).



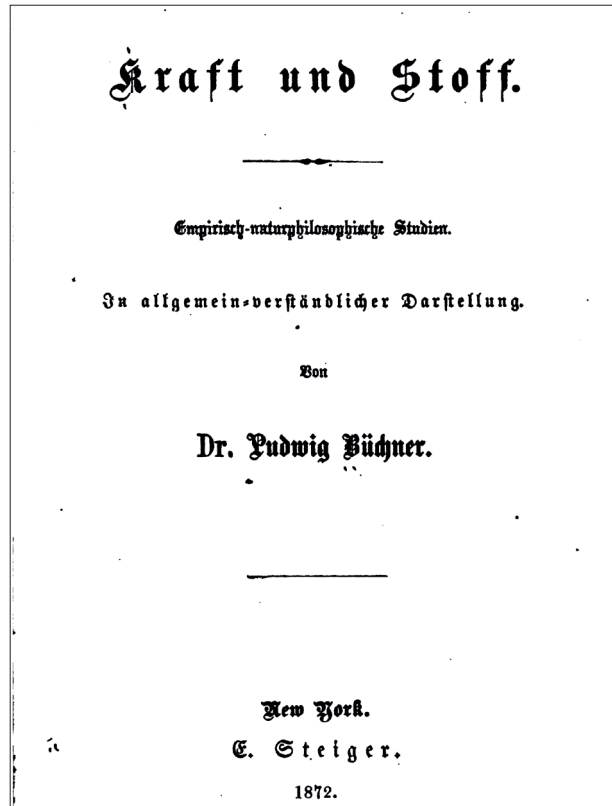


Figura 13. Portada del libro *Kraft und Stoff* de L. Büchner. Edición de 1872 publicada por E. Steiger (New York). Ejemplar depositado en la University of Wisconsin.

Posteriormente, ya dentro de la etapa de la Restauración Borbónica (1874-1931), el físico Enrique Serrano Fatigati (fig. 14) promovió en el seno de la Institución Libre de Enseñanza un enfoque que podría denominarse «evolucionismo energético». Este iba acorde con la filosofía liberal progresista que se potenciaba pedagógicamente en la citada institución educativa. Inspirándose en el evolucionismo de corte lamarckista de la época y en la primera ley de la termodinámica, Serrano Fatigati postulaba que el cosmos en su conjunto estaba constantemente transformándose y progresando de forma indefinida. Por tanto, el progreso social era una demanda que presentaba apoyatura en dichas leyes naturales, justificándose desde la ciencia los ideales generales que se reivindicaban desde la Institución Libre de Enseñanza (cf. Pohl 2009: 132-133).

Ante ello nos puede surgir una pregunta: ¿cómo conciliaba Serrano Fatigati dicha «constante progresista» con la tendencia entrópica de la segunda ley? Básicamente el físico español consideraba que la naturaleza era infinita, y que la idea de la muerte térmica del universo solo era posible dentro de un sistema finito (cf. Pohl 2011: 198). En razón de ello, podríamos considerarle un auténtico heterodoxo al no concebir a nivel cosmológico la termodinámica de sistemas cerrados, adelantándose así a su tiempo. Sus ideas serían luego potenciadas y desarrolladas por Laureano Calderón, Francisco Quiroga y Rodríguez y José Rodríguez Mourelo entre otros.

En la década de 1880 el campo de la termodinámica comenzó a utilizarse para establecer un símil entre el cuerpo social y la máquina de vapor en términos productivistas. La sociedad empezó a ser vista por algunos intelectuales burgueses como un ingenio térmico, y la única forma de evitar el equilibrio termodinámico, es decir, el colapso o la muerte del sistema, era incrementando la capacidad productiva de la industria sobre la base del disciplinado trabajo de los obreros. Evidentemente, tales posturas liberales deben ponerse en conexión directa con el auge del movimiento proletario en las zonas fabriles del país, a cuyas reivindicaciones estos intelectuales burgueses se oponían total o parcialmente.

En esta línea de pensamiento podemos poner como ejemplo la figura de Laureano Calderón. Catedrático de Química Orgánica en la Universidad de Santiago y vinculado a la Institución Libre de Enseñanza, llegó a plantear en el Ateneo de Madrid que los principios de la termodinámica debían emplearse en pos del progreso sobre la base de la desigualdad humana. Tal desequilibrio en esencia no era otra cosa que un gradiente que constantemente se trataba de disipar a partir de la competencia individual, y era lo que hacía que la maquinaria social funcionase:

Llegará un día en que el fisiólogo podrá predecir al examinar un recién nacido cuáles son los caracteres de aquella complicada máquina, cuáles son sus resortes y cuántas sus energías, qué defectos existen en aquel organismo y á qué cualidades morales corresponden; y entonces á la obra hoy colectiva, empírica y brutal de la pedagogía, se sustituirá un trabajo paciente, detenido, con el que se procurará equilibrar en lo posible facultades destinadas á eterna lucha ó á completa inutilidad. [...] No [se] caerá en el error de pedir á una máquina viciosamente construida la regularidad en la marcha que el principio teórico supone en la máquina ideal, ni [se] cometerá el absurdo de esperar que sanción penal alguna fuera capaz de hacer de Nerón un Marco Aurelio ni de Lais una Lucrecia (Calderón 1884: 131)<sup>23</sup>.

También se concibió que las mejoras en las condiciones de vida del proletariado irían en beneficio de la productividad, pues cada obrero era a fin de cuentas parte del mecanismo que transformaba la energía en trabajo (Pohl 2009: 135). Por ello, ciertos liberales progresistas defendieron que para solucionar la llamada «cuestión obrera» no había que eliminar la desigualdad social, tal y como proponían socialistas y marxistas: «Hacer que esta energía se distribuya por igual entre todos los órganos de la máquina, equivale a suprimir el desnivel, y por tanto, a hacer imposible la función regular de aquella» (Calderón 1891: 10)<sup>24</sup>. Lo que había que hacer, en opinión de estos intelectuales, era mejorar las condiciones de vida de los trabajadores potenciando su higiene, su salud, su correcta alimentación, regulando la jornada laboral, reduciendo la siniestralidad, etc. (Pohl 2010: 45; Pohl 2012: 37).

Un tema distinto sobre el que igualmente se proyectó una lectura termodinámica fue el relacionado con el comercio. Mientras que personalidades como José Echegaray defendieron el librecambismo desde presupuestos energéticos, otros como Pere

---

23. Tomado de S. Pohl (2010: 44).

24. Tomado de S. Pohl (2010: 53).



Figura 14. Fotografía de Enrique Serrano Fatigati (1840-1918).

Estasen plantearon lo contrario, tratando de apuntalar el proteccionismo y los aranceles (Pohl 2010: 45-47):

[El libre-cambio busca] utilizar la mayor suma posible de la energía potencial diseminada en las fuerzas naturales y disminuir en todo lo que se pueda las fuerzas que el hombre haya de desarrollar sacándolas del fondo de su sér [*sic*] (Echegaray 1881: 124)<sup>25</sup>.

Con la disminución de la resistencia se gastará menos fuerza, se economizará más fuerza, pero no por eso se creará más fuerza. La energía en el mundo material se acumula, recogién-dola de los grandes centros donde está latente. Acumular fuerza y organizar materia, es preparar la función y la vida; es realizar un acto esencial a la vida; remover los obstáculos, es realizar un acto accesorio (Estasen 1880: 40)<sup>26</sup>.

---

25. Tomado de S. Pohl (2010: 46).

26. Tomado de S. Pohl (2010: 47).

### La etapa o posicionamiento «heurístico»

Se desarrolla a partir de la década de 1940 y se caracteriza por considerar la importancia de la termodinámica para analizar y explicar fenómenos socioculturales de forma no instrumentalista respecto a la moral, la política o la religión. El inicio de esta etapa puede asociarse a las reflexiones del célebre antropólogo Leslie A. White.

Como ha comentado Leonardo Tyrtania (2007: 18), uno de los rasgos que caracterizó a la antropología de White fue el plantear una contradicción entre la tendencia a la entropía de los sistemas físicos no vivos y la evolución biológica:

La segunda ley de la termodinámica nos dice que el cosmos, como un todo, se disgrega estructuralmente y se extingue dinámicamente; la materia se pone cada vez menos organizada y la energía más uniformemente difundida. Pero en un minúsculo sector del cosmos, a saber, en los sistemas materiales vivientes, el sentido del proceso cósmico aparece invertido: la organización de la materia y la concentración de la energía se hacen cada vez más elevadas. La vida es un proceso de construcción, estructuración. [...] La evolución biológica es sencillamente una expresión del proceso termodinámico que corre en sentido opuesto a aquel especificado por la segunda ley para el cosmos como un todo. Es un movimiento que tiende hacia una mayor organización, una mayor diferenciación de estructuras, una mayor especialización de funciones, mayores niveles de integración, y más altos grados de concentración de energía (White 1982: 340).

Si confrontamos la figura de Leslie A. White, cuyos trabajos más destacados se desarrollaron sobre todo en la primera mitad del siglo XX, con la del también norteamericano Henry B. Adams, del siglo anterior, podemos observar una serie de diferencias en el pensamiento histórico-antropológico estadounidense respecto a la influencia de la termodinámica. Si bien ambos autores consideran los postulados clásicos de la ciencia de la energía, Adams asume un criterio profundamente pesimista: las sociedades y culturas se ven sumidas en una constante desestructuración, en un proceso de decadencia que se explica por la imposición entrópica de la segunda ley.

En cambio White proyecta en sus escritos una perspectiva optimista que nace de la paradoja entre la tendencia a la entropía del cosmos y la constante complicación evolutiva de la vida en general. Entendía que tanto la vida como los elementos culturales son sistemas termodinámicos que tienden a organizarse *in crescendo* sobre la base de una incorporación de energía que va en aumento (cf. White 1982: 340-341). Por ello su reflexión se presenta como una visión positiva del devenir biológico y cultural. Ciñéndonos a esto mismo quizás hubiera sido conveniente enmarcarlo dentro de la categoría que se ha denominado «político-moralista». Sin embargo, el hecho de que no ponga su planteamiento al servicio de la política y de los juicios morales tan abiertamente nos ha impulsado a lo contrario.

Sobre esta base teórica, White (1959) terminó exponiendo un esquema de evolución sociocultural articulado por las estrategias de captación energética. Dicho esquema evolutivo va desde las comunidades de cazadores-recolectores a las agropecuarias, pasándose luego a los Estados contemporáneos que centran su razón de ser en el uso de combustibles fósiles. El desarrollo científico del momento le hizo proponer como posible cuarto estadio evolutivo el de unas futuras sociedades cuya complejidad tendría apoyatura en la energía nuclear o atómica.

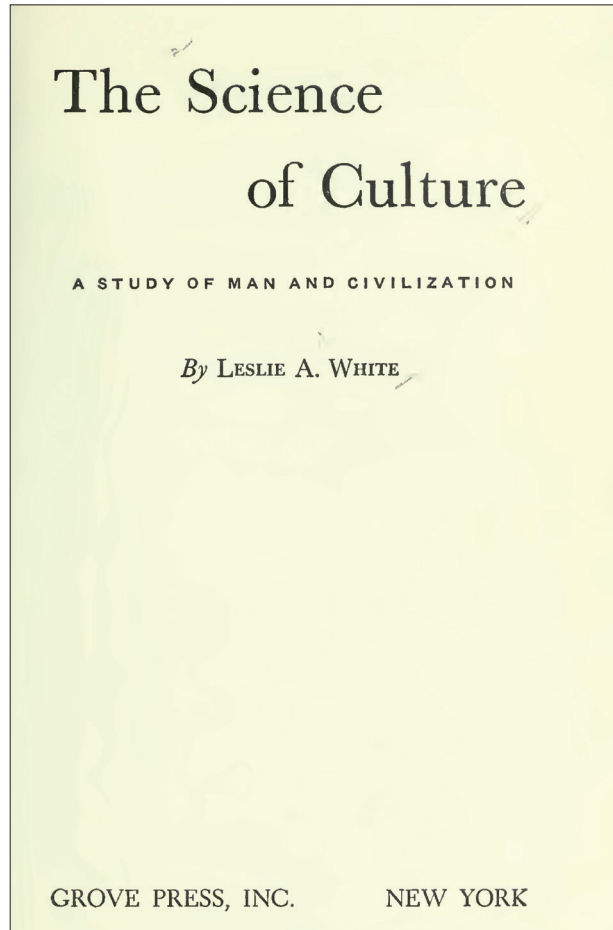


Figura 15. Portada del libro *The Science of Culture. A Study of Man and Civilization* de L.A. White. Edición de 1949 publicada por Grove Press (New York).

La antropología de Leslie A. White fue una constante fuente de inspiración para la disciplina (fig. 15). Sobre la base de ella se desarrollarían estrategias de trabajo como la ecología cultural de Julian Steward o el materialismo cultural de Marvin Harris. También fue un punto de referencia clave para las generaciones de arqueólogos enmarcadas en la *New Archaeology* (Johnson 2000: 47).

Los arqueólogos españoles sabemos que a nuestro país llegaron estas corrientes en la década de 1980, cuando en el resto del mundo sus pilares empezaron a ser cuestionados por los enfoques postmodernos. La dictadura franquista ancló el desarrollo teórico de antropólogos y arqueólogos nacionales respecto a las novedades que se cocían en el panorama internacional entre 1939 y 1975 (cf. Díaz-Andreu 1993-1994: 201).

Sin embargo, no podemos evitar ver cómo el enfoque optimista de la energética de White es en parte parecido al de algunos de los eruditos españoles de los que ya hemos hablado –sin que ello implique una deuda teórica del primero respecto a los segundos–. Pero lo más anecdótico de todo ello es que si bien tal perspectiva fue acogida como

novedosa en la antropología norteamericana de los años 40, en el ámbito de la física quedó desfasada en esa misma década. Erwin Schrödinger había solventado la citada paradoja redefiniendo diversos conceptos como ya se ha visto, asentando una nueva base que poco después desarrollarían otros como Ilya Prigogine. Es posible que White desconociera el alcance de la obra de Schrödinger y que por ello concibiera en sus estudios socioculturales los principios de la termodinámica clásica.

Al calor de la nueva termodinámica, el análisis evolutivo de White resulta altamente problemático, con el lastre que esto supuso tanto para el llamado neoevolucionismo como para la ecología cultural y la *New Archaeology* (cf. Tyrtania 2009: 77-78). Ello tiene un claro reflejo en la teoría de sistemas que él sostuvo, y que posteriormente otros ampliaron (p. ej. Binford 2007; Clarke 1984): el sistema cambia cuando se produce un desajuste que afecta a alguno de los subsistemas de los que se compone. En razón de ello, todas las partes que conforman el sistema experimentan modificaciones, reajustes que tienden a lograr de nuevo la estasis sistémica. Dentro de dicha dinámica de cambios en búsqueda del equilibrio, los sistemas socioculturales van ganando complejidad debido a un mayor procesado de energía. Esto último se desprende de la famosa fórmula de White relativa al cálculo del grado de desarrollo cultural:

$$C = E \times T$$

Dicha ecuación expresa que el grado de desarrollo cultural de una sociedad ( $C$ ) es igual a la energía empleada anualmente *per capita* ( $E$ ) por la eficiencia tecnológica de la misma para captar energía del entorno ( $T$ ). Así, podría decirse que mientras más energía procese una sociedad debido a la alta eficiencia del subsistema tecnológico para captarla, mayor desarrollo cultural tendrá en general (Alcina 2008: 45). Ya hemos dicho antes que esta lectura energética a la hora de considerar la evolución sociocultural es bastante parca e insostenible desde la TNE. Una aplicación correcta de ella nos llevaría a sostener que los sistemas están constantemente cambiando debido a la acción «desordenadora» de la segunda ley. De hecho, el equilibrio sistémico supondría la muerte del sistema desde un punto de vista termodinámico (Schneider & Sagan 2009: 21).

En 1960 Marshall D. Sahlins y Elman R. Service editaron *Evolution and Culture*, donde abordaban diferentes asuntos relacionados con la evolución de los entramados culturales. En términos generales podemos decir que su percepción sobre la evolución trata de conciliar la postura de White, de quien eran discípulos (Alcina 1999: 89-90), con la de Steward. En razón de esto diferencian dos tipos de procesos evolutivos que para ellos no son opuestos, pues ambos tienen lugar: uno general y de tendencia universal, que casa con el neoevolucionismo unilineal y progresivista de White, y de otra parte aquellas tendencias específicas, de corte adaptacionista en función de los rasgos de cada ecosistema, y por ello de proyección multilineal.

Pero lo que más nos interesa aquí es destacar que en el segundo capítulo de dicho libro estos antropólogos expresan claramente la relevancia otorgada a la termodinámica para comprender la «evolución general» (Sahlins & Service 1960: 12-44). Entienden que la eficiencia termodinámica de los organismos es igual a la división entre el *output* y el *input* energético. Pero que un organismo sea eficiente desde el punto de vista energético no implica que tenga que estar más desarrollado desde el punto de vista evolutivo.

Para estos autores, el grado de desarrollo evolutivo «general» –el progreso de las formas vivas–, tanto en sus manifestaciones somáticas como culturales, depende directamente de la cantidad de energía que se es capaz de captar del entorno para el mantenimiento e incremento del orden estructural, así como la capacidad de mantenerla dentro del sistema el mayor tiempo posible (Sahlins & Service 1960: 22-23). Estos autores afirmaron que

El antropólogo cultural que explora los avances etnográficos y arqueológicos de su disciplina se enfrenta a la variedad, y a nada más. Hay muchísimos tipos de culturas, pertenecientes a étnias o a regiones, así como hay diversidad dentro de la propia cultura y en la forma de organizar la cultura para dar cohesión. ¿Cómo sucede esto? En pocas palabras, gracias a la modificación adaptativa: la cultura se ha diversificando hasta tal punto que ha ido encajando en la variedad de oportunidades para la existencia humana que permite la Tierra. Esto se corresponde con el aspecto específico de la evolución cultural [...]. [Sin embargo,] la evolución específica no supone la totalidad de la evolución cultural. La cultura no solo produce formas de secuencias adaptativas, sino que también formas superiores; la cultura no solo ha experimentado desarrollo filogenético, también progreso general. En resumidas cuentas, la cultura ha evolucionado tanto en términos generales como en términos específicos. [...] En síntesis, la evolución cultural general se corresponde con el paso de un manejo menor a otro mayor de energía, con el paso de niveles bajos a niveles altos de integración y con el paso de un menor grado a un mayor grado de adaptabilidad general. Por su parte, la evolución específica se trata del paso filogenético, ramificante e histórico de la cultura a lo largo de sus múltiples líneas, esto es, la modificación adaptativa de las culturas particulares<sup>27</sup>.

La pareja de antropólogos norteamericanos no dudó en acusar a la biología de su tiempo por haberse centrado exclusivamente en lo que ellos llamaban «evolución específica», dejando relegada al olvido la «evolución general» (Sahlins & Service 1960: 39). Sin embargo, tal y como se verá de forma más detallada en el segundo bloque del libro, esta distinción carece de rigor. No existen dos tipos diferentes de evolución. La evolución es una, y se produce a partir de la variación de replicantes –genéticos o culturales– y la retención selectiva de los mismos en función de su aportación al *fitness*. Tan errados estaban Sahlins y Service en su análisis sobre la evolución que no solo cometieron el fallo anotado, sino que tampoco apuntaron al centro de la diana cuando al definir la «evolución específica» la orientaron hacia la adaptabilidad<sup>28</sup>. Ahora bien, existen distintos tipos de unidades de selección y diferentes niveles de presiones selectivas (Soler 2003; Wilson & Wilson 2009). Uno de estos niveles es el termodinámico, que todo lo envuelve, pero en ningún momento marca trayectorias de progreso, pues la realidad, en clave energética, está constantemente ordenándose, desordenándose y reordenándose (Schneider & Sagan 2009).

Pero si analizamos estrictamente a estos autores desde el punto de vista de la historia de la disciplina, debemos comprender su propuesta teórica desde la aceptación de la paradoja que se deriva de los postulados clásicos de la termodinámica. Desde ella, y estrictamente hablando, se entiende que la segunda ley impone la inevitable tendencia a la entropía, por lo que cualquier sistema existente en el universo terminará degradándose,

27. Traducción al español del original en lengua inglesa (cf. Sahlins & Service 1960: 23, 28 y 38).

28. Para una exhaustiva crítica sobre este asunto véase el trabajo de M.J. O'Brien y T.H. Holland (2007).

pues la única tendencia posible en términos generales sería la muerte térmica. Por tanto, si se considera que la cultura humana, en su conjunto, presenta la dirección opuesta a la trayectoria entrópica del universo, cabe hablar de la evolución cultural en términos de progreso creciente, tal y como hacen Sahlins y Service al abordar su concepto de «evolución general» de la cultura. En cambio, desde la actual TNE no puede afirmarse progreso alguno, pues la evolución es un proceso caótico, y la segunda ley es la que produce el desorden productivo. La postura de Sahlins y de Service no dista en esencia mucho de la de White: los tres consideran que la vida en el fondo es una excepción al enunciado clásico de la termodinámica, y por tanto, los entramados socioculturales de los homínidos también.

Se deben citar dentro de esta etapa los trabajos antropológicos de Richard N. Adams, quién intentó corregir los errores teóricos de White aplicando la termodinámica al estudio de los procesos socioculturales relativos a las relaciones de poder. La gran virtud de Adams fue la consideración de los fenómenos sociales y culturales como sistemas abiertos que deben ser analizados desde la termodinámica del no equilibrio.

Su aproximación inicial al tema se vio influida por Leslie A. White, de quien había sido compañero en la Universidad de Michigan. En torno a 1960, aconsejado por físicos, deja a un lado dicha línea de trabajo ya que, desde los postulados clásicos de la termodinámica, no se podía comprender la sociedad humana al no tratarse de un sistema cerrado. Diez años después, en 1970, Adams tuvo la necesidad de retomar el asunto. Su análisis antropológico sobre las relaciones del poder «había llegado a un punto en que ya no podía sostenerse sin alguna explicación de la dinámica que lo hacía funcionar» (Adams 2007: 50-51). Fruto del citado reencuentro fue su obra *Energía y estructura. Una teoría del poder social* (Adams 1983).

Cuando esta obra vio la luz su autor aún desconocía los aportes que a la termodinámica habían hecho científicos importantes como Ilya Prigogine, aun convergiendo con ellos, de ahí su valioso carácter innovador dentro del ámbito de la antropología. El mismo Richard N. Adams hace referencia a esta cuestión al reconocer que:

Más o menos dos semanas después de la publicación de *Energy and Structure* en marzo de 1975, conocí al doctor Jay Portnow, que en esos momentos era miembro del *Center for Statistical Dynamics* de la Universidad de Texas en Austin. Al enterarse de mi reciente incursión en el campo de la termodinámica, me sugirió que conociera al doctor Ilya Prigogine, director del Centro en Austin y de un grupo de la Université Libre de Bruselas [sic]. Descubrí entonces que había sido Prigogine quien, a principios de la década de 1960, había trazado el concepto de estructura disipativa dentro de una nueva área de la física interesada por los fenómenos de no-equilibrio (Adams 2007: 50).

Otro hito importante en la producción de Adams fue *El octavo día. La evolución social como autoorganización de la energía* (2001). Este libro supone una profunda reflexión en la que la evolución, concretamente de los conjuntos sociales, es descrita en clave energética a partir de la termodinámica del no equilibrio. Adams combinó, por tanto, los principios de la evolución darwiniana con las leyes de la física que explican la dinámica de la energía en el universo. Más recientemente se ha publicado su obra *La expansión de la red humana* (2007), donde aplica nuevamente los mismos principios teóricos al campo de la antropología.



Debe decirse que si pesáramos en una balanza la influencia bibliométrica de Adams respecto a la de White, esta probablemente se inclinaría con creces en favor del segundo, pese a que los trabajos del primero presentan una mayor consiliencia con otras ramas científicas actuales, como la biología y la física.

De forma paralela a estos antropólogos, una serie de economistas trató de originar, también en la década de 1970, un cambio de paradigma en el seno de su disciplina. El maestro de dicha escuela, llamada termoeconomía, fue el rumano Nicholas Georgescu-Roegen. Con su obra *La ley de la entropía y el proceso económico* (1996), rompió tanto con la doctrina económica liberal neoclásica como con la marxista. Estas dos líneas de pensamiento económico clásico parten de una misma base epistémica que puede ser desglosada en dos axiomas fundamentales.

En primer lugar, ambas se caracterizan por concebir los procesos económicos bajo la ilusión del crecimiento ilimitado de bienes (Georgescu-Roegen 1975: 781). Incluso cuando llegan a considerar la escasez de ciertos bienes, entienden que el desarrollo tecnológico puede «sustituir ilimitadamente los antiguos recursos por otros nuevos» (Daly 1989: 21), lo cual supone una tajante violación de las dos primeras leyes de la termodinámica. De otro lado, asumen que tras la Revolución Neolítica, y los orígenes de la economía productiva, el ser humano ya no dependió directamente de su ambiente para sobrevivir, ya que la fuente fundamental de alimentos dejó de ser la caza y la recolección para serlo la agricultura y la ganadería (cf. Daly 1989: 18).

La termoeconomía, en cambio, considera que cualquier explotación y transformación de los recursos tiene un coste energético irreversible que debe ser tenido en cuenta para efectuar un análisis económico más profundo. Cuestiona la idea del crecimiento ilimitado, ya que el mundo donde se desarrollan los procesos económicos es materialmente finito (Daly 1989: 19-20). Por tanto, reinserta al animal humano como parte integrante de los ecosistemas y aborda los aspectos biofísicos de la economía (Ramos 2012: 70-71).

Muy influenciado por los trabajos de White –aun siendo razonablemente crítico con él en algunos puntos flacos de su teoría– se encuentra la aproximación que hizo Wilfred Shawcross en un capítulo de libro titulado *Energy and ecology: thermodynamic models in archaeology* (1972). Este arqueólogo revaloriza sobre todo la importancia de la primera ley de la termodinámica de cara a la comprensión antropológica de las comunidades humanas del pasado y de los sitios arqueológicos.

Shawcross parte de la base de que el individuo humano es una pieza elemental dentro de los procesos de transformación energética, ya que requiere incorporar energía para vivir a través de distintas estrategias económicas. Si bien el aporte de un solo individuo a este proceso no dista mucho del que pueda aportar cualquier animal de otra especie semejante, la diferencia radica en el hecho de que el individuo humano forma parte de un enorme organismo social que transforma la energía a una escala mucho más grande.

Este autor entiende que los yacimientos arqueológicos se componen de parte de los restos de la transformación de la energía por tales colectivos. Esto se ve claramente reflejado en los desechos de alimentos, pero también en el resto de elementos que componen el registro arqueológico, ya que son el resultado de la energía transformada en forma de trabajo para satisfacer ciertas necesidades o cumplir determinadas funciones, trabajo que convirtió materias primas en artefactos (p. ej. un bifaz hecho a partir de un nódulo de piedra) o que empleó determinados artefactos para conseguir otros (p. ej. una cabaña

construida a partir de postes de madera y de otros elementos previamente modificados). Incluso unidades arqueológicas mayores, como pudiera ser un *tell* –en cuya formación no solo entran en juego tomas de decisiones, sino también procesos fortuitos o accidentales–, pueden entenderse de esta forma según Shawcross.

Desde la arqueología podemos hacer aproximaciones cuantitativas a tales procesos de transformación energética mediante su medición en distintas unidades que permiten correlacionar el aporte calórico de los restos de alimentos documentados con las necesidades calóricas de la población y con la transformación de dicha energía en trabajo<sup>29</sup>. Para ello Shawcross analiza dos casos concretos de yacimientos prehistóricos de la costa de Nueva Zelanda: el de Mount Camel y el de Galatea Bay.

Si bien este arqueólogo trabaja especialmente con la primera ley de la termodinámica para comprender las transferencias energéticas y sus implicaciones socioculturales –lo cual no es poca cosa–, creemos fundamental el concepto de sitio o yacimiento arqueológico que se deriva de su aportación. Los yacimientos pueden conceptualizarse como unidades disipadoras de gradientes energéticos, ya que fosilizan asentamientos o espacios donde tuvieron lugar actividades humanas, y que por tanto implicaron la realización de transferencias o transformaciones energéticas.

En 1990 el arqueólogo Bruce G. Trigger publicó un artículo titulado *Monumental Architecture: A Thermodynamic Explanation of Symbolic Behaviour*. Su reflexión debe encajarse dentro de un contexto en el que el desarrollo de la postmodernidad en el pensamiento arqueológico rechazó los postulados de la Nueva Arqueología por su excesivo racionalismo económico y por el determinismo ecológico que sostuvieron algunos de sus partidarios. Los arqueólogos postprocesuales comenzaron a defender la necesidad de comprender las culturas en clave interna, interesándose por interpretaciones que podrían definirse como «emic».

Una de las grandes críticas que el postprocesualismo efectuó giraba en torno a la parquedad con la que los nuevos arqueólogos se habían enfrentado a cuestiones simbólicas desde sus análisis materialistas, reivindicando con ello una vuelta hacia lecturas idealistas de base constructivista. El trabajo de Trigger pretende retomar el análisis termodinámico de aspectos culturales como una forma de criticar el excesivo antideterminismo de estas nuevas corrientes interpretativas. En última instancia, lo que pretendía demostrar con ello es que los enfoques materialistas servían no solo para explicar cuestiones de carácter económico e independientes del mentalismo humano, como la necesidad de captar energía del entorno, sino también de relaciones sociopolíticas e ideológicas (cf. Trigger 1990: 129).

Para ello toma como caso de estudio la arquitectura monumental, es decir, aquella basada en casas, edificios públicos, etc. cuyas dimensiones y/o rasgos materiales exceden con creces las funciones básicas de tales espacios arquitectónicos. Esta clase de arquitectura es reflejo de un tipo de sociedad de jefatura avanzada o bien ya estatal en la que la emergencia de una élite es capaz de canalizar esfuerzos comunitarios para resaltar o acentuar el grado de desigualdad social. Su propuesta entronca, desde el ámbito de la arqueología, con la línea abierta por Richard N. Adams (2001) y otros antropólogos como Joseph A. Tainter (1988), a quienes utiliza como fuentes bibliográficas básicas.

---

29. Para los cálculos llevados a cabo por el autor, véase también Shawcross 1968.

Aterrizando en el panorama investigador de habla hispana, contamos con los trabajos de Leonardo Tyrtania. Discípulo de Richard N. Adams, este antropólogo mexicano ha llevado a cabo importantes contribuciones desde el ámbito de lo teórico y aplicaciones a casos de análisis prácticos relativos a la comprensión de sociedades campesinas actuales. Así, pueden destacarse sus obras *Termodinámica de la supervivencia para las ciencias sociales* (1999) o *Evolución y sociedad. Termodinámica de la supervivencia para una sociedad a escala humana* (2009). La escuela mexicana cuenta igualmente con aportaciones teóricas y de aplicaciones concretas que han venido de la mano de autores como Alberto Conde (2011a y 2011b), Marilú Briones (2011) o Juan Espinoza y Pedro A. Ortiz (2014) entre otros.

Ya en los albores del siglo XXI la proyección de la termodinámica, tanto en lo referente a sus postulados clásicos como a los del no equilibrio, parece presentar cierta relevancia y continuidad. Quizás esto termine marcando el desarrollo de tendencias y de líneas de investigación futuras.

En este sentido, solo citar a modo de ejemplo algunos trabajos como el que José Luis Escacena (2009) ha realizado para evaluar los criterios de conservación patrimonial del yacimiento fenicio de El Carambolo (Camas, Sevilla), o la llamada de atención de Daniel García Rivero (2004: 29) sobre la necesidad de considerar la teoría de la evolución darwiniana y la termodinámica para explicar sucesiones ecológicas entre las poblaciones de las Edades del Cobre y del Bronce en el sur de la península ibérica. Podríamos incluso poner sobre la mesa la sugerencia de John Bintliff (2012) al dejar caer que un enfoque termodinámico puede sernos útil para comprender diversas problemáticas de la Tardoantigüedad. Tanto es así que en nuestra tesis doctoral hemos combinado la termodinámica del no equilibrio con la teoría de construcción de nichos para explicar la evolución del poblamiento humano en el Bajo Guadalquivir (SO de España) durante la Antigüedad Tardía (Pérez-Aguilar 2018b)<sup>30</sup>. En esta tesis, también hacemos una aproximación al cálculo de la entropía tanto de sistemas poblacionales como de yacimientos arqueológicos concretos apoyándonos en la definición de Ben-Naim (2011). De forma paralela a nuestro trabajo, Pascual Izquierdo-Egea (2018) ha efectuado una propuesta para medir la entropía de las sociedades antiguas a partir del registro funerario, inspirándose para ello en la ecuación de Boltzmann.

---

30. Algunas publicaciones parciales e inconclusas de la misma pueden consultarse en L.G. Pérez-Aguilar (2017, 2018a y 2019).